

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program B2341 – Strojírenství

Materiály a technologie

Zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Stanovení vlivu historie zatěžování na diagramy mezních přetvoření materiálu TWIP 1200

Assesment the influence of loading history to the forming limit diagrams of TWIP 1200 material

Tomáš Hutla
KSP-TP-B57

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. – TU v Liberci

Konzultant bakalářské práce: Ing. Jiří Sobotka – TU v Liberci

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 38

Počet obrázků: 20

Počet tabulek: 12

Počet příloh: 1

Datum: 5.6.2009

MÍSTO TOHOHLE LISTU
LIST „ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE“

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: B2341 – Strojírenství

Student: Tomáš Hutla

Téma práce: Stanovení vlivu historie zatěžování na diagramy mezních přetvoření materiálu TWIP 1200

Assesment the influence of loading history to the forming limit diagrams of TWIP 1200 material

Číslo BP: KSP-TP-B57

Vedoucí BP: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. – TU v Liberci

Konzultant BP: Ing. Jiří Sobotka – TU v Liberci

Abstrakt: Tato bakalářská práce se zabývá stanovením diagramů mezních přetvoření materiálu TWIP 1200. Teoretická část se zabývá problematikou plastické deformace a diagramy mezního přetvoření. Experimentální část se zabývá zjišťováním diagramů mezního přetvoření za různých podmínek předdeformace.

Abstract: This bachelory work is concerned with assesment of the forming limit diagrams of TWIP 1200 material. The theoretical part is occupy by plastic deformation problems and by forming limit diagrams. The experimental part is occupy by determination the forming limit diagrams under the terms of a different predeformation.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 5. června 2009

.....

Tomáš Hutla
Hlubočská 113
280 02 Kolín 6

Poděkování

Rád bych poděkoval především konzultantovi mé bakalářské práce, ing. Jiřímu Sobotkovi, za cenné rady a pomoc při řešení problémů, týkajících se této práce. Dále děkuji vedoucímu mé bakalářské práce, ing. Pavlovi Solfronkovi, Ph.D., za dohled nad vypracováním práce.

V neposlední řadě děkuji svým rodičům, za umožnění studia na vysoké škole a trpělivost a podporu během studia.

OBSAH

Seznam použitých zkratk a symbolů	77
1. Úvod	88
2. Teoretická část	Chyba! Záložka není definována. 9
2.1. Plastická deformace.....	Chyba! Záložka není definována. 9
2.1.1. Podmínky a vznik plastické deformace	9
2.1.2. Dislokace	100
2.1.3. Mechanismy plastické deformace .	Chyba! Záložka není definována. 2
2.2. Plechy používané v automobilovém průmyslu	Chyba! Záložka není definována. 3
2.3. Plechy z TWIP ocelí	Chyba! Záložka není definována. 4
2.4. Diagramy mezních přetvoření (DMP)	Chyba! Záložka není definována. 7
2.4.1. Určování diagramů mezních přetvoření	Chyba! Záložka není definována. 9
2.4.2. Mezní stavy	21
2.4.2.1. Určování mezních stavů	21
3. Experimentální část	22
3.1. Zkoušený materiál TWIP 1200	22
3.2. Podmínky zkoušení materiálu, stroj, nástroj	23
3.3. Zkoušené vzorky materiálu	25
3.3.1. Deformační síť na povrchu vzorků.....	26
3.4. Průběh zkoušky	27
3.5. Zpracování naměřených hodnot	28
3.6. DMP pro zkoušku FR.....	29
3.6.1. Zkoušky FR 13 a FR 23	30
3.6.1.1. DMP pro zkoušku FR 13	32
3.6.1.2. DMP pro zkoušku FR 23	33
3.6.2. Srovnání DMP za všech podmínek (FR, FR 13, FR 23).....	34
4. Závěr	35
5. Seznam použité literatury	37
6. Seznam příloh	Chyba! Záložka není definována. 38



Označení	Jednotky	Význam
A, B, C	-	Regresní koeficienty polynomicke křivky
A ₅₀	%	Tažnost
BH	-	Zvýšení meze kluzu při vypalování laku (B ake H ardening)
DMP	-	Diagram mezního přetvoření
DP	-	Dvoufázové ocele (D ual P hase)
FLC	-	Křivka mezního přetvoření (F orming L imit C urve)
FLD	-	Diagram mezního přetvoření (F orming L imit D igram)
FR	-	Podmínky zjišťování DMP (v=17,78 m/s)
FR 13	-	Podmínky zjišťování DMP (v=17,78 m/s, předdeformace 1/3)
FR 23	-	Podmínky zjišťování DMP (v=17,78 m/s, předdeformace 2/3)
IF	-	Ocele bez intersticií (I nterstitials F ree)
KMP	-	Křivka mezního přetvoření
L ₀ , L _i	mm	Počáteční a konečná měřená délka
L ₀₁ , L ₀₂	mm	Počáteční rozměry elementů
L ₁ , L ₂	mm	Konečné rozměry zdeformovaných elementů
M _ε	-	Epsilon martenzit
m _σ	-	Stav napjatosti
m _φ	-	Ukazatel stavu přetvoření
n	-	Koeficient deformačního zpevnění
R _m	MPa	Mez pevnosti
R _{p0,2}	MPa	Smluvní (nevýrazná) mez kluzu
TRIP	-	T Ransformation Induced P lasticity
TWIP	-	T Winning Induced P lasticity
V	m ³	Objem
γ, SFE	mJ/m ²	Energie vstevné chyby (S tacking F ault E nergy)
ρ	m ⁻²	Hustota dislokací
σ ₁ , σ ₂	MPa	Hlavní normálová napětí v rovině plechu
ΣL	m	Celková délka dislokačních čar v jednotce objemu
φ ₁ , φ ₂	-	Hlavní a vedlejší přetvoření
φ _{1k} , φ _{2k}	-	Kritická mezní přetvoření
φ _i	-	Intenzita přetvoření



Seznam použitých zkratk a symbolů

1. Úvod

V současné době jsou v automobilovém průmyslu prioritní 2 hlediska, a to bezpečnost a ekologie. Zvyšování bezpečnosti automobilu (ať už pasivní či aktivní) je cílem odborníků již dlouhou dobu, od vynalezení tříbodového bezpečnostního pásu (Nils Bohlin – 1959), přes airbagy, deformační zóny a elektronické systémy, po systémy kooperující s ostatními vozidly (Car2Car). Všechny tyto prvky však mají negativní dopad na ekologii provozu automobilu. Elektronické systémy potřebují pro svůj chod energii a všechny součásti mají svou hmotnost, tedy zvyšují spotřebu paliva. Z pohledu moderních vozidel vybavených mnoha bezpečnostními prvky se rozhodně nejedná o zanedbatelný nárůst. A zde se bezpečnostní požadavky konfrontují s ekologickými.

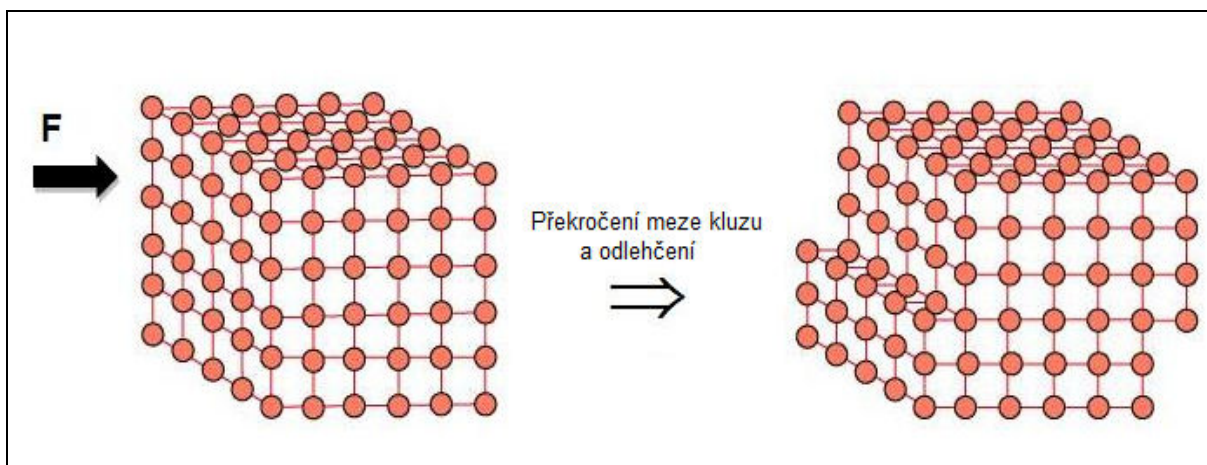
V době, kdy automobily spalují fosilní paliva, která na Zemi povážlivě docházejí, nelze na zvyšující se spotřebu automobilů nebrat ohled. Další ekologické hledisko jsou vypouštěné emise. V době globálního oteplování planety je zvyšování emisí velmi nežádoucí. Téměř všechny automobilky usilovně pracují na vývoji hybridních pohonů pro své automobily, některé (např. Toyota nebo Honda) již sériově vyrábějí automobily s hybridním pohonem. Avšak masové rozšíření alternativního pohonu je stále hudbou budoucnosti. Z těchto důvodů v sériové výrobě převládá snaha snížit spotřebu paliva. Moderní automobil je tedy kompromisem mezi ekologickými a bezpečnostními požadavky.

Tímto kompromisem mezi bezpečností a ekologií je také materiál, kterým se zabývá tato bakalářská práce. Tento materiál má velmi vysoké pevnostní charakteristiky, není zde tedy nutnost zvyšovat tloušťku materiálu. Materiál vykazuje tzv. **TWIP efekt** (**T**Winning **I**nduced **P**lasticity – plasticita indukovaná dvojčatěním). Základem chování tohoto materiálu je tedy rozvoj plastické deformace dvojčatěním. Označení TWIP se používá pro celou řadu materiálů, ve kterých probíhá efekt dvojčatění. TWIP materiály mají velmi vysokou pevnost ($R_m=1150$ MPa) při zachování velké tažnosti ($A_{50}=60\%$). Proto jsou vhodným a perspektivním materiálem pro automobilový průmysl. Tato práce hodnotí tvářitelnost materiálu TWIP 1200 za různých podmínek zkoušení pomocí diagramu mezních přetvoření (DMP), které ukazují hodnoty maximálních dovolených deformací materiálu pro tváření bez porušení.

2. Teoretická část

2.1. Plastická deformace

Působením dostatečně velkého zatížení, kdy materiál mění svůj tvar bez vzniku trhlin, dochází k *deformaci materiálu*. Podle fyzikální povahy je možné deformaci rozdělit na *pružnou (elastickou) deformaci*, kdy se materiál bude vracet do původního tvaru, pokud přestane působit síla, která způsobila pružnou deformaci, a na ***plastickou deformaci***. U plastické deformace změna tvaru zůstává zachovaná i po odstranění příčiny deformace, pokud napětí vzroste nad určitou hodnotu (mez kluzu) (*obr. 2.1*). Z hlediska tváření kovů má největší význam plastická deformace, i když vliv elastické deformace má také vliv na konečný tvar výrobku. Velikost deformace závisí na teplotě, rychlosti zatěžování, napjatosti, chemickém složení, zpevnění materiálu, tření, atd. Tyto všechny vlivy se navenek projevují odporem kovu ke změně tvaru – *deformačním odporem*. [3], [12]



Obr. 2.1 Schéma plastické deformace

2.1.1. Podmínky a vznik plastické deformace

Plastická deformace je ve své podstatě pohyb jednotlivých částí kovu vůči sobě a mechanismus vzniku plastické deformace je možné vysvětlit na základě pohybu a vzniku mřížkových poruch. Stavba krystalové mřížky tudíž není v reálných kovech dokonalá. Podle velikosti a tvaru krystalografické neuspořádanosti atomů lze z geometrického hlediska rozeznávat následující mřížkové poruchy:

- bodové (vakance, intersticie, substituce)
- čárové (hranové, šroubové a kombinované) – nejvýznamnější,
- plošné (vrstevné vady, hranice zrn, subzrn, dvojčatění),
- prostorové (hranice krystalů, vměstky, amorfni částice, apod.).

2.1.2. Dislokace

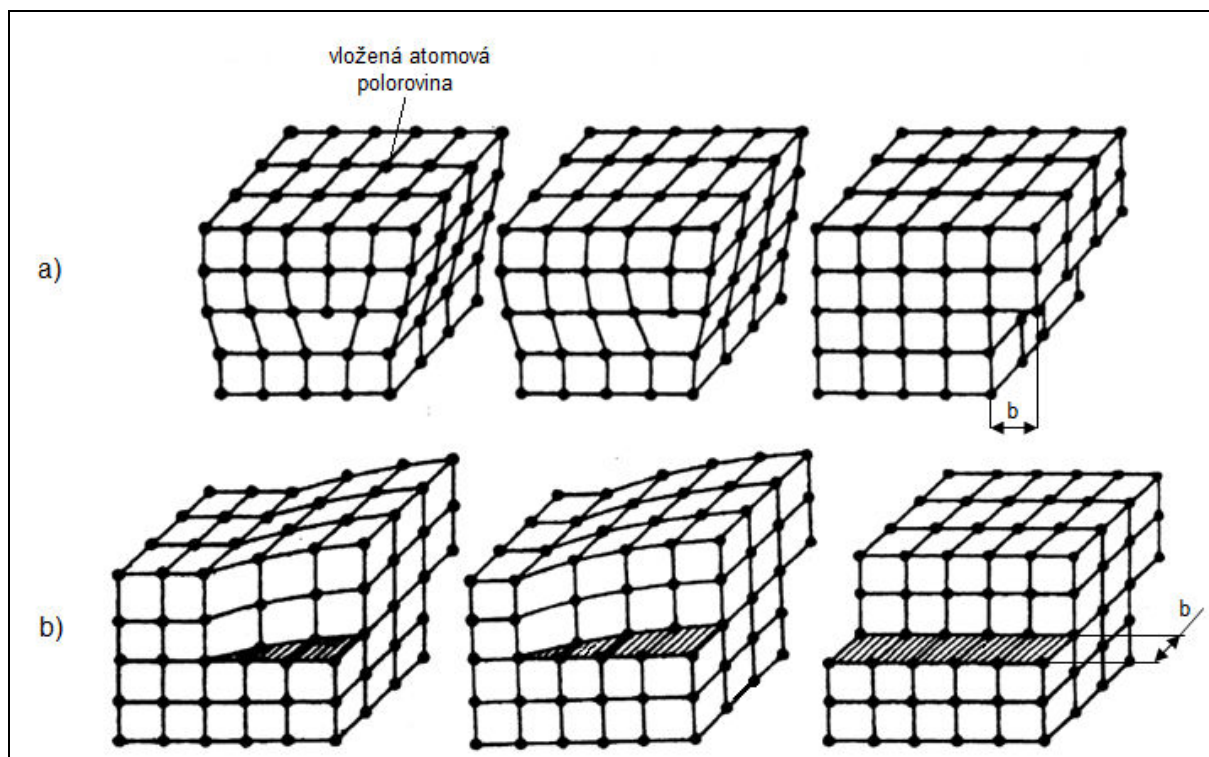
Na plasticitu kovů mají rozhodující vliv čárové poruchy – *dislokace*. Dislokace jsou poruchy, které se projevují vysunutím atomů z pravidelných poloh krystalové mřížky a které se mohou v krystalové mřížce pohybovat, vznikat a zanikat. Dislokace jsou buď hranové, nebo šroubové, resp. kombinované (*obr. 2.2*). Hustota dislokací ρ je definovaná vzorcem (1) [12].

$$\rho = \frac{\sum L}{V} [m^{-2}] \quad (1)$$

kde je:

$\sum L$... celková délka dislokačních čar v jednotce objemu [m]

V ... objem [m^3]



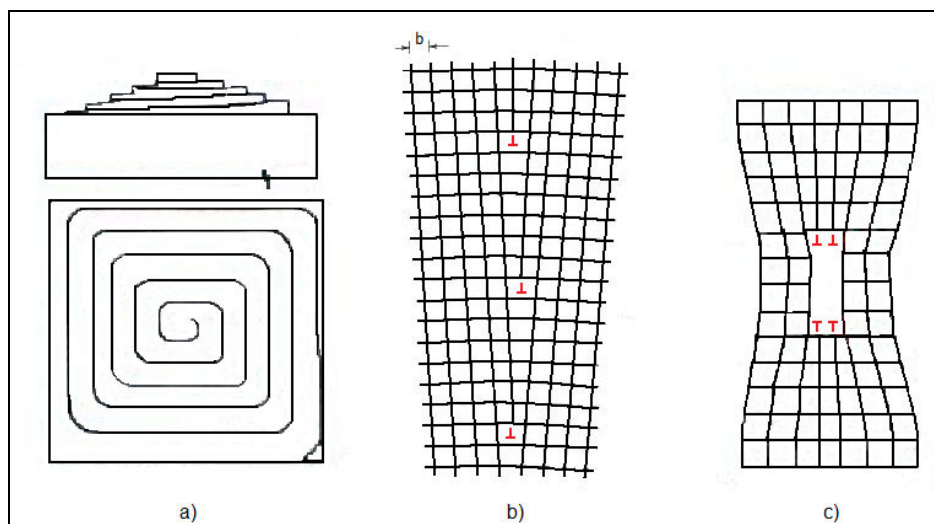
Obr. 2.2 Schématické znázornění dislokací v krystalické mřížce

a) hranová dislokace, b) šroubová dislokace

Hustota dislokací ovlivňuje pevnost kovu. Tvářením se počet dislokací zvyšuje a tím roste odpor proti deformaci, dochází ke zpevnění a zvýšení pevnosti. Hustota dislokací vyjadřuje množství dislokací v materiálu. Jedná se tedy počet dislokací protínajících jednotkovou plochu libovolného řezu, nebo o celkovou délku čar v jednotkovém objemu.

Dislokace během tváření mohou vznikat následujícími procesy:

- krystalizací kovů, kdy vzniká růstová spirála a dochází ke vzniku šroubových dislokací (*obr. 2.3 a*),
- růstem zrn do bloků mohou vznikat hranové a šroubové dislokace,
- změnou shluku vakancí na dislokace (*obr. 2.3 c*),
- Frank-Readovým zdrojem dislokací za působení smykového namáhání, kdy dochází k rozdělení dislokační čáry na dvě dislokace,
- v oblasti vysokých napětí v případě, kdy vznikají ostré trhliny,
- skluzem, kdy se dislokace pohybuje v rovině skluzu za působení napětí.
- difúzí, nebo také „šplháním“ dislokací, což je naopak pomalý pohyb spojený s vakancemi a intersticiálními atomy, závislý na teplotě a napětí.

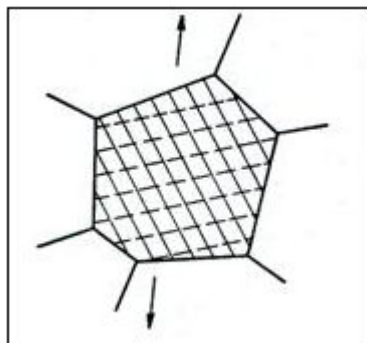


Obr. 2.3 Mechanismy vzniku dislokací

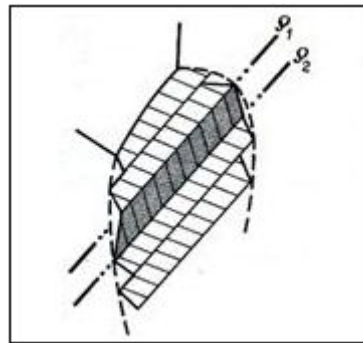
a) růstová spirála, b) spojování subzrn na malouhlových hranicích, c) přeměna shluku vakancí

2.1.3. Mechanismy plastické deformace

Základním mechanismem plastické deformace je pohyb dislokací. Mez kluzu tedy musí odpovídat napětí, při němž dochází k začátku pohybu dislokací. Rozeznáváme dva základní mechanismy plastické deformace, a to **skluzem** (obr. 2.4), a **dvojčatěním** (obr. 2.5). Vždy se rozvíjí ten mechanismus plastické deformace, který při daných podmínkách vyžaduje menší napětí. U skluzu se (nadbytečná) vrstva atomů pohybuje ve směru působícího napětí, dokud nedospěje na povrch krystalu, a nevytvoří tak trvalou deformaci [13]. U dvojčatění se přeskupuje část krystalu tak, že se celá mřížka nejdříve natočí do příznivé polohy pro skluz a následně se část natočeného krystalu skluzem deformuje.



Obr. 2.4 Zrno zdeformované skluzem



Obr. 2.5 Zrno zdeformované dvojčatěním

Dvojčatění může vznikat při růstu krystalů (růstová neboli primární dvojčata), při rekrytalizaci (inverzní dvojčata) nebo při deformaci (deformační dvojčata). Dále může nastat při žíhání následujícím plastickou deformaci. Jelikož pravděpodobnost vzniku dvojčat roste s klesající teplotou a s rostoucí rychlostí silového působení, mechanické dvojčatění vzniká za podmínek zatížení vysokými rychlostmi (šokové zatížení) a snížení teploty. Je to proces, při kterém se vytváří podél roviny souměrný zrcadlový obraz krystalografické mřížky. Rozdíly mezi deformací skluzem a dvojčatěním jsou v tab 2.1.

Tab. 2.1 Rozdíly v deformaci skluzem a dvojčatěním

Rozdíly v deformaci skluzem a dvojčatěním	
Skluz	Dvojčatění
orientace krystalu nad a pod rovinou skluzu zůstává stejná	kolem roviny dvojčatění se mění
pohyb atomů se odehrává na vzdálenost násobků meziatomové vzdálenosti	je menší než meziatomová vzdálenost
probíhá v relativně vzdálených rovinách	deformace se účastní všechny roviny
probíhá v milisekundách	probíhá v mikrosekundách
směr skluzu je vždy totožný se směrem nejhustěji obsazeným atomy	Může být doprovázeno zvukovým efektem , a projeví se „zoubkováním“ na záznamu tahové zkoušky
z dané skupiny rovin a směrů je činný ten skluzový systém (rovina a směr), kde má skluzové napětí největší hodnotu	jeho význam spočívá ve vytvoření příznivé orientace v mřížce pro vznik nových skluzových systémů u mřížek s omezeným počtem skluzových systémů

2.2. Plechy používané v automobilovém průmyslu

Pro splnění náročných, a stále se zvyšujících požadavků automobilového průmyslu byly vyvinuty plechy s vhodným poměrem tažnosti a pevnosti, zaručujícím vysoké pevnostní charakteristiky a současně vysokou tažnost. Tyto plechy lze rozdělit podle jejich vlastností na hlubokotažné a vysokopevnostní.

Rozdělení plechů používaných v automobilovém průmyslu:

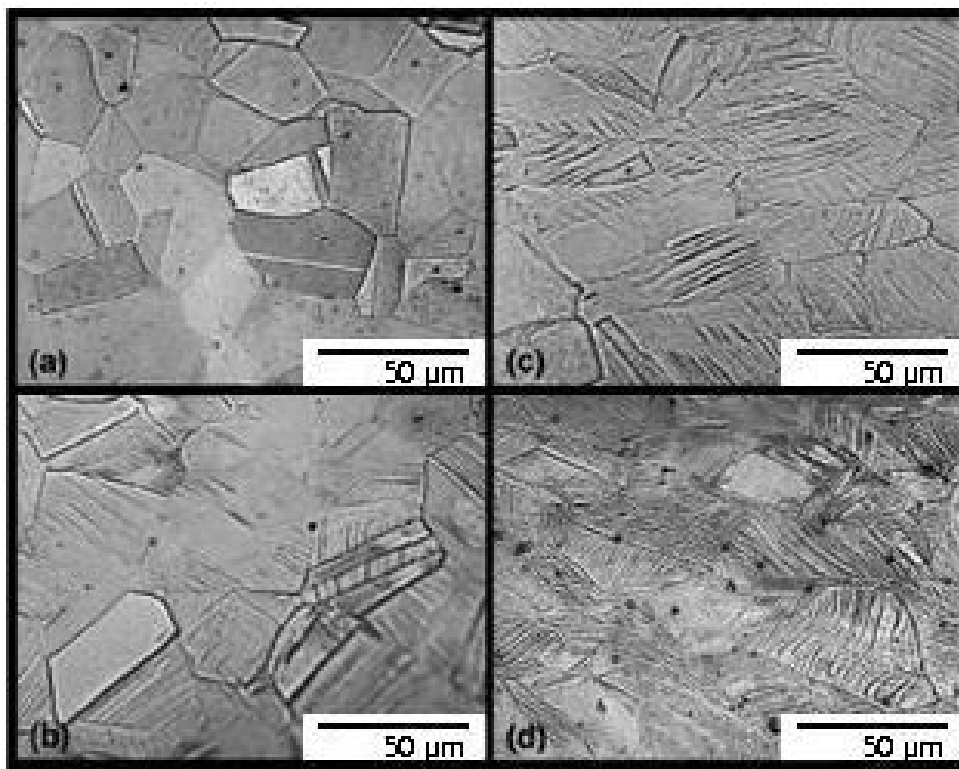
- Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem
 - o CQ (**C**omercial **Q**uality) plechy běžné kvality
 - o DQ (**D**rawing **Q**uality) tažné plechy
 - o DDQ (**D**eep **D**rawing **Q**uality) hlubokotažné plechy
 - o EDDQ (**E**xtra **D**eep **D**rawing **Q**uality) zvlášť hlubokotažné plechy

- EDDQ-S (**E**xtra **D**eep **D**rawing **Q**uality-**S**uper)
super hlubokotažné plechy
- Plechy z IF ocelí (**I**nterstitials **F**ree)
- Plechy z IF ocelí s BH efektem (**B**ake **H**ardening)
 - BH oceli se zvýšeným obsahem uhlíku
 - BH oceli se zvýšeným obsahem titanu, resp. niobu
- Vysokopevnostní plechy
 - DP oceli (**D**ual **P**hase)
 - TRIP oceli (**T**Ransformation Induced **P**lasticity)
 - TWIP oceli (**T**Winning Induced **P**lasticity)
 - CP oceli (**C**omplex **P**hase)
 - Martenzitické oceli

2.3. Plechy z TWIP ocelí

Oceli založené na plasticitě indukované mechanickým dvojčatěním (TWIP – Twinning Induced Plasticity), s pozoruhodnými kombinacemi meze pevnosti a tažnosti byli vyvinuty cca před 10-ti lety. Podle experimentů lze dosáhnout prodloužení až 85% při napětí 800Mpa [6], přičemž hodnoty napětí a prodloužení kolísají s teplotou, rychlostí deformace a chemickým složení [7]. Mezi všemi deformačními mechanismy pro austenitické oceli má TWIP efekt nejlepší účinek na zpevňování oceli. Právě proto jsou TWIP oceli pro svoji velmi vysokou pevnost (až 1200 MPa) a extrémní tažnost vhodný materiál pro nosné díly konstrukce karosérie, které jsou vystaveny nadměrnému zatížení. Vysokých hodnot pevnosti a tažnosti se dosahuje hlavně díky vysokému koeficientu deformačního zpevnění ($n \cong 0,42$). Mechanické dvojčatění austenitu se uskutečňuje během deformace a pro dosažení TWIP účinku je nutné zajistit přesné složení slitiny takovým způsobem, že transformační energie nedovolí napětově indukovanému austenitu přeměnit se na martenzit a dojde tak k dvojčatění. Pro vysvětlení hlavních charakteristik a chování TWIP ocelí bylo provedeno spoustu studií a experimentů, které prokázaly jejich

výhody. Na *obr. 2.6* je optickým mikroskopem pořízený snímek mikrostruktury TWIP oceli.



Obr. 2.6 Mikrostruktura TWIP oceli: optické snímky výbrusu

typické TWIP oceli: (a) nenamáhané, (b) 18% deformace, (c) 26% deformace, (d) 34% deformace

Hlavní rozdíl mezi TRIP (**TR**ansformation **I**nduced **P**lasticity – transformačně indukovaná plasticita) a TWIP ocelmi je ten, že u TRIP ocelí je austenit v zrna stabilní při chladnutí, ale ne při mechanickém zatížení. To znamená, že fáze přetvoření nastane, když je materiál zatížený. Na rozdíl od toho v TWIP ocelích není fáze přetvoření ani při chladnutí ani při deformaci, ale orientace části austenitu se změní působením mechanického dvojčatění. Rozdílné chování austenitu je přisuzováno pohybu dislokací. Na krystal se můžeme dívat jako na hodně blízké shluky atomů uspořádané v pravidelné posloupnosti. Nicméně tato posloupnost může obsahovat chyby, nazývané jako vrstevné chyby, mající určitou energii (SFE - **S**tacking **F**ault **E**nergy). Používáme označení „energie vrstevných chyb“ - γ [J/m²]. SFE se mění se složením slitiny a s deformační teplotou. Jejich význam pro skluz dislokací a jiné mechanismy závisí na stupni deformace. Jak SFE klesají, skluz dislokací se stává obtížnějším a mechanické

dvojčatění se stává hlavním deformačním mechanismem. Nicméně, při velmi nízké energii vrstevných chyb, se napětím indukovaný $M\epsilon$ stává převládajícím [9].

Tabulka 2.2 ukazuje energii vrstevných chyb a deformační režimy pro vybrané materiály. Je evidentní, že mechanické tvoření dvojčat nastává při nízkých hodnotách SFE.

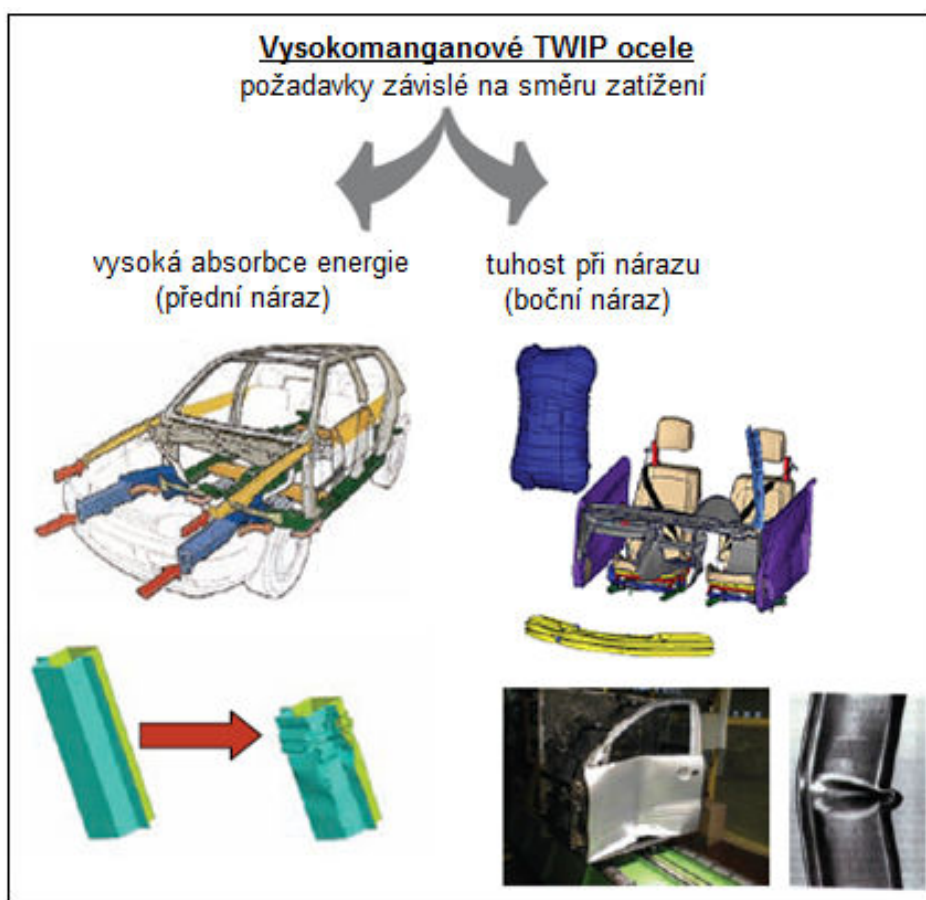
TWIP ocele obvykle obsahují velké koncentrace Mn. Jejich typické složení je 3% Si, 3% Al a více než 20% Mn (jedná se o hmotnostní procenta). V *tabulce 2.3* je složení typických TWIP (a TRIP) ocelí používaných pro experimenty. Když ocel obsahuje 15 hm. % Mn, lze pozorovat jen TRIP efekt, zatímco při 20 hm. % Mn lze nalézt TRIP i TWIP efekt. Přesné koncentrace se mohou lišit podle použitých legujících prvků. Obecně je Mn užíván pro stabilizaci austenitu a zároveň snížení energie vrstevné chyby; hliník naopak SFE zvyšuje a křemík snižuje. Změnou složení slitiny a deformační teploty se energie vrstevných chyb může přesouvat do míst příznivých pro tvoření dvojčat. Tato energie by pro TWIP ocel měla být méně než 25 mJ/m^2 , ale více než 16 mJ/m^2 [7]. Na *obr. 2.7* jsou příklady použití TWIP ocelí v konstrukci automobilu.

Tab. 2.2 Energie vrstevné chyby γ a mechanismus plastické deformace pro vybrané materiály

Slitina, Kov	Složení [%]	$\gamma [\text{mJ/m}^2]$	Mechanismus plastické deformace
MP35N	35Ni-35Co-20Cr-10Mo	13	Skluz / dvojčatění
70/30 Mosaz	70Cu-30Zn	7	Skluz / dvojčatění
80/20 Mosaz	80Cu-20Zn	9	Skluz / dvojčatění
90/10 Mosaz	90Cu-10Zn	18	Skluz / dvojčatění
Ocel Hadfield	12.34Mn-1.03C-zbytekFe	25	Skluz / dvojčatění
Hořčík	Mg	125	Skluz
Zinek	Zn	140	Skluz
Hliník	Al	166	Skluz / dvojčatění

Tab. 2.3 Složení typických TWIP (a TRIP) ocelí

Mn [%]	Si [%]	Al [%]	C [ppm]	kategorie
15,8	3,3	2,9	200	TRIP
20,1	2,8	2,9	400	TWIP/TRIP
26,5	3,0	2,8	300	TWIP
29,2	3,0	2,8	200	TWIP



Obr. 2.7 Příklad použití TWIP ocelí v konstrukci automobilu

2.4. Diagramy mezních přetvoření (DMP)

V důsledku snahy sestavit komplexní diagram, který by lépe zohlednil faktory ovlivňující proces tváření, byl sestaven **DMP** (anglicky **FLD – Forming Limit Diagram**). Představa vyhodnocení plechu s grafickým znázorněním sestávajícím se z hlavního přetvoření v závislosti na vedlejším přetvoření byla představena koncem 60-tých let 20. století **Keelerem a Goodwinem** [10]. Pomocí tohoto diagramu je možné vyhodnotit různé napěťové podmínky ve stejném grafickém znázornění a určit jeho meze pevnosti pro zvláštní kombinaci napětí. Lze ho chápat jako mapy užitečné plastičnosti daného plechu. Základní formou **DMP** je pásmo bodů, které představují hodnoty mezních přetvoření. Nad tímto pásmem se objeví zúžení a přetržení. Výzkumem **DMP** se zabývalo několik autorů, a proto existuje i několik způsobů jeho určení. Jeden z možných typů je diagram **Tomlenův** zakreslený v souřadnicích

ukazatel stavu napjatosti m_σ – intenzita přetvoření φ_i . Stav napjatosti je dán vzorcem (2).

$$m_\sigma = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} [-] \quad (2)$$

kde je:

σ_1 a σ_2 ... hlavní normálová napětí v rovině plechu [MPa]

Druhým (a častěji používaným) typem DMP je **Keller - Goodwinův** (obr. 2.8), sestrojený jako závislost hlavního přetvoření φ_1 na vedlejším φ_2 . Logaritmické přetvoření je obecně dáno vztahem (3). Poměrem těchto dvou přetvoření získáme hodnotu tzv. **ukazatele stavu přetvoření m_φ** daného vzorcem (4).

$$\varphi_i = \ln \frac{L_i}{L_0} [-] \quad (3)$$

kde je:

L_i ... konečná měřená délka [mm]

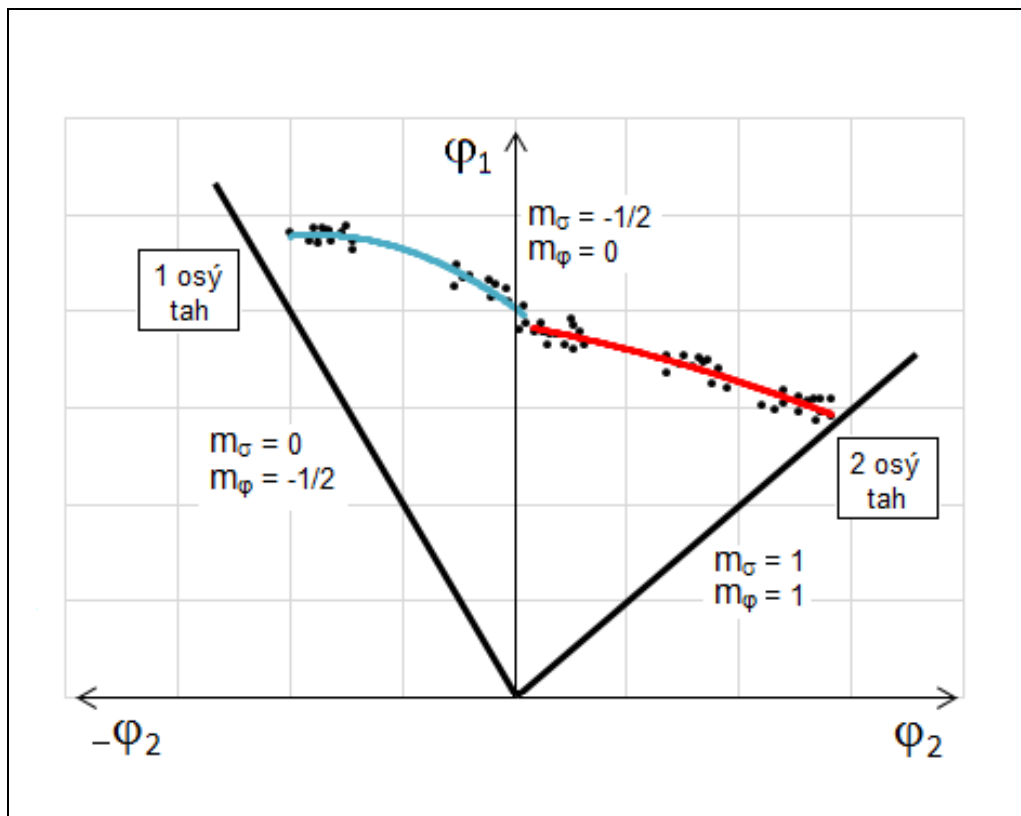
L_0 ... počáteční měřená délka [mm]

$$m_\varphi = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} [-] \quad (4)$$

kde je:

φ_2 ... vedlejší mezní přetvoření [-]

φ_1 ... hlavní mezní přetvoření [-]



Obr. 2.8 Diagram mezních přetvoření DMP druhého typu (Keller - Goodwinův)

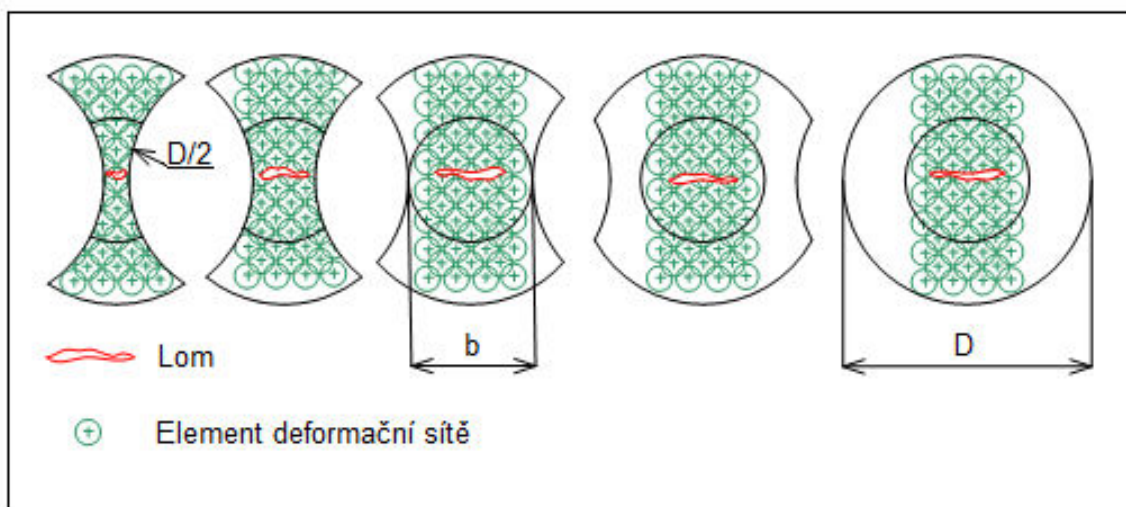
V diagramu na obr. 2.8 tvoří m_φ takzvané **lineární deformační stopy**. Jsou to přímky vycházející z počátku souřadného systému a m_φ je na nich rovno konstantě. Tento druhý typ DMP se ukázal jako názornější a výstižnější, proto je také častěji používán.

2.4.1. Určování diagramů mezních přetvoření

Diagramy mezního přetvoření se dají určit několika způsoby, z nichž některé jsou vhodné např. jen pro levou nebo pravou stranu DMP. Postupem času však byly vytvořeny metody vhodné pro sestrojení obou KMP. Přehled metod použitelných na sestrojení KMP je v tab. 2.3. Na obr. 2.9 je tvar kruhových přístřihů používaných při vypínání polokulovým tažníkem.

Tab. 2.3 Metody vhodné k sestrojení DMP

Metody určování diagramu mezního přetvoření		
Metoda	Popis	
Zkouška tahem	Různých stavů přetvoření docílíme různými tvary vrubů na zkušební tyčce, která se ale deformuje převážně lineárně. Proto je velmi obtížné stanovit elementy pro zjištění mezního přetvoření. Prakticky nepoužitelný pro konstrukci pravé křivky v DMP.	
Vypínání plechu tlakem kapaliny (hydraulická zkouška)	Různých stavů přetvoření lze docílit různými tvary tažnic (od kruhové po eliptickou). Vhodná na pravou stranu DMP, nevýhoda vysoká cena tažnic.	
Hloubení plechu tažníky různých poloměrů	Vhodná metoda pro sestrojení levé i pravé strany DMP, nevýhodou je také vysoká cena tažnic	
Vypínání zkušebních těles různé šíře polokulovým tažníkem	Taky vhodná pro levou i pravou KMP, dále lze ještě rozdělit na:	Vypínání přístřihů ve tvaru různě širokých pásů (Nakazimova metoda)
		Vypínání kruhových přístřihů s odstřiženými kruhovými úsečemi různě velkých poloměrů .
		Vypínání kruhových přístřihů s odstřiženými kruhovými úsečemi stejně velkých poloměrů polokulovým tažníkem (obr. 5.2). Nejvhodnější metoda [10], použitá v experimentu



Obr. 2.9 Kruhové přístřihy s odstřiženými úsečemi stejného poloměru

2.4.2. Mezní stavy

Při technologiích plošného tváření plechů, např. tažení nebo lisování, se jako jeden z nejdůležitějších parametrů daného materiálu jeví hodnota jeho mezního přetvoření, tj. okamžiku prvního možného vzniku porušení materiálu, vzniku trhlin. Na vznik mezního stavu v materiálu má vliv velké množství parametrů, které lze obecně rozdělit na několik skupin, stejně jako i samotné mezní stavy (deformace, místní porušení, lom).

Problém však nastává již při definování vlastního pojmu mezního stavu. Při dosažení velkých plastických přetvoření můžeme například za mezní stav považovat interval mezi mezí pevnosti a vznikem tvárného lomu, avšak mezi těmito hranicemi může existovat řada dalších různě definovaných mezních stavů. Druhá, výhodnější varianta, určuje jako mezní stav okamžik vzniku trhliny. Tato alternativa nemá takový rozptyl hodnot jako metoda první, avšak trhlina v materiálu znamená zmetek. Proto existuje střední cesta uvažující mezní přetvoření jako takové, při kterém dojde ke vzniku lokálního zúžení.

2.4.2.1. Určování mezních stavů

Bylo vyvinuto mnoho metod pro zjištění DMP. Například **metoda ekvivalentního bodu**, jejíž princip spočívá v tom, že se na zkoumaném vzorku vyberou dvě velikosti přetvoření si odpovídající oblasti, a pokud v jedné z nich vznikne lom, pak dle přijaté definice můžeme pokládat přetvoření v druhé oblasti za mezní. Tento postup však může být různě vyhodnocován, pro byly vypracovány nové snažící se odstranit nedostatky metody první. První dvě z nich vytvořil **Veerman** a jsou to metody **grafická** a **interpolační**.

Další možný postup je sestrojení **křivky mezních přetvoření** (dále jen KMP, v angličtině FLC – **F**orming **L**imit **C**urve), neboli DMP pro okamžik vzniku lomu, kdy měřený element je pouze jeden, ovšem musí být umístěn v počátku vzniku lomu a lom samotný musí procházet jeho středem.

Poslední z metod je metoda použitá **Heckerem**, jejíž výběr zahrnuje elementy zasažené lomem, lokálním ztenčením nebo sousedící s místem porušení, ale které nejsou zasaženy ani lomem ani lokálním ztenčením.

3. Experimentální část

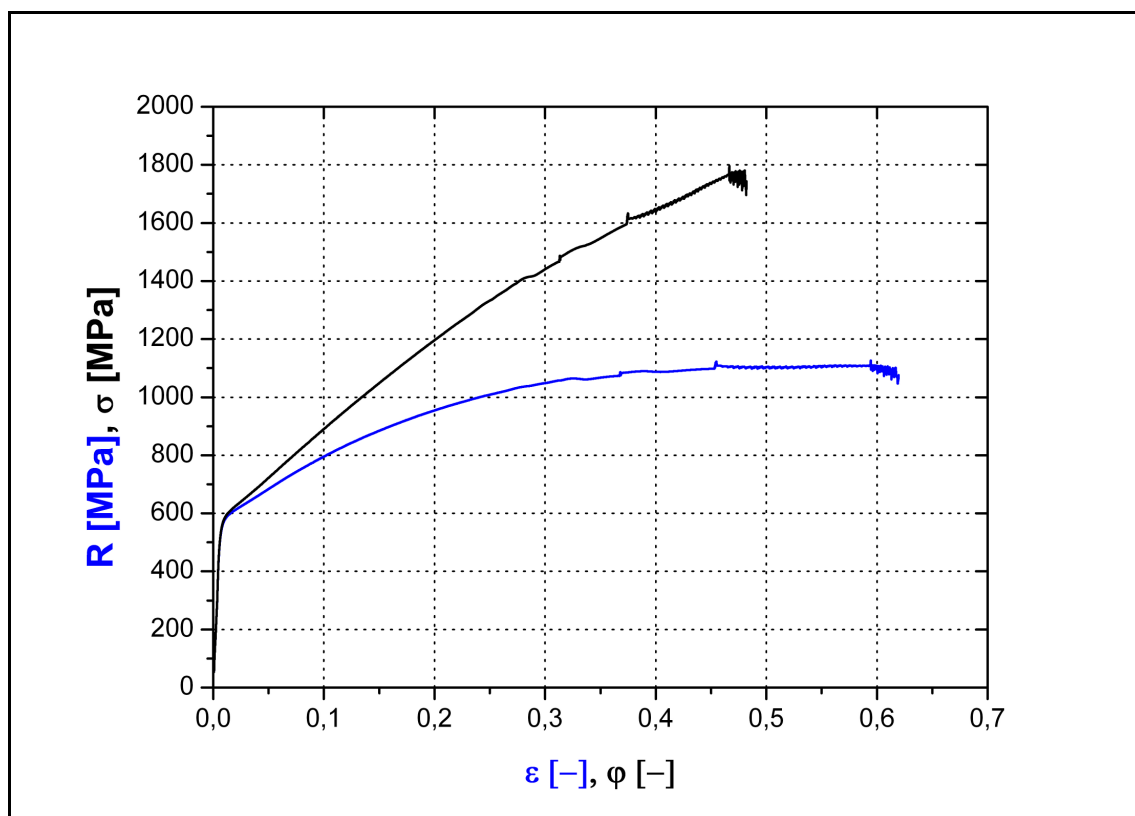
Cílem experimentální části bylo stanovit diagramy mezního přetvoření (DMP), tedy určit pomocí křivek mezního přetvoření (KMP) oblast bezpečných deformací materiálu TWIP 1200 pro různé podmínky zkoušení. Rychlost tažení (vypínajícího vzorky materiálu) byla konstantní: $v = 17,78 \text{ m/s}$. Proměnnou hodnotou byla velikost předdeformace zkoušeného vzorku, první zkouška probíhala bez předdeformace, druhá po předdeformaci $1/3$ mezního stavu, a třetí po předdeformaci $2/3$ mezního stavu. V závěru je porovnáváno chování materiálu při vypínání vzorků po různých hodnotách předdeformace. Teorii o DMP se zabývá kapitola 2.4.

3.1. Zkoušený materiál TWIP 1200

V experimentální části byl zkoušen materiál, patřící do skupiny TWIP ocelí. Jedná se o austenitickou ocel s vysokým obsahem Mn, který zmenšuje energii vrstevné chyby (SFE), což umožňuje proces mechanického dvojčatění. Se vzrůstající deformací vzrůstá počet zrn, ve kterých tento proces probíhá. Pro své mechanické vlastnosti byla tato ocel označena jako TWIP 1200. Podle složení ji lze označit jako ocel Fe-Mn-C (Fe-19%Mn-0,6%C).

Jejím základním znakem je právě nízká SFE za pokojové teploty. Obsahuje-li ale materiál více než 20% Mn, pak dochází k nežádoucímu zvyšování SFE, která se zvyšuje i se stoupajícím podílem C, a to dokonce mnohem rychleji než se stoupajícím Mn. Pro udržení nízké SFE je tedy důležitý hlavně nízký obsah C. Velikost SFE určuje mechanismus deformace ocele, jelikož dvojčatění probíhá při její nízké hodnotě.

Ocel TWIP 1200 je tedy austenitická a nemagnetická ocel, kde neprobíhá žádná fázová přeměna. Má vysokou tažnost i pevnost ($R_m = 1150 \text{ MPa}$, $R_{p0,2} \approx 590 \text{ MPa}$, $A_{50} = 60\%$ - obr. 3.1) tyto vlastnosti jsou přisuzovány hlavně vysokému exponentu deformačního zpevnění. Ten umožňuje dosažení velkého protváření před vznikem krčku (díky probíhajícímu dvojčatění je toto označováno jako TWIP efekt). Výrobce této oceli je ArcelorMittal a její chemické složení je v tab. 3.1.



Obr. 3.1 Záznam tahové zkoušky materiálu TWIP 1200

Tab. 3.1 Chemické složení materiálu TWIP 1200

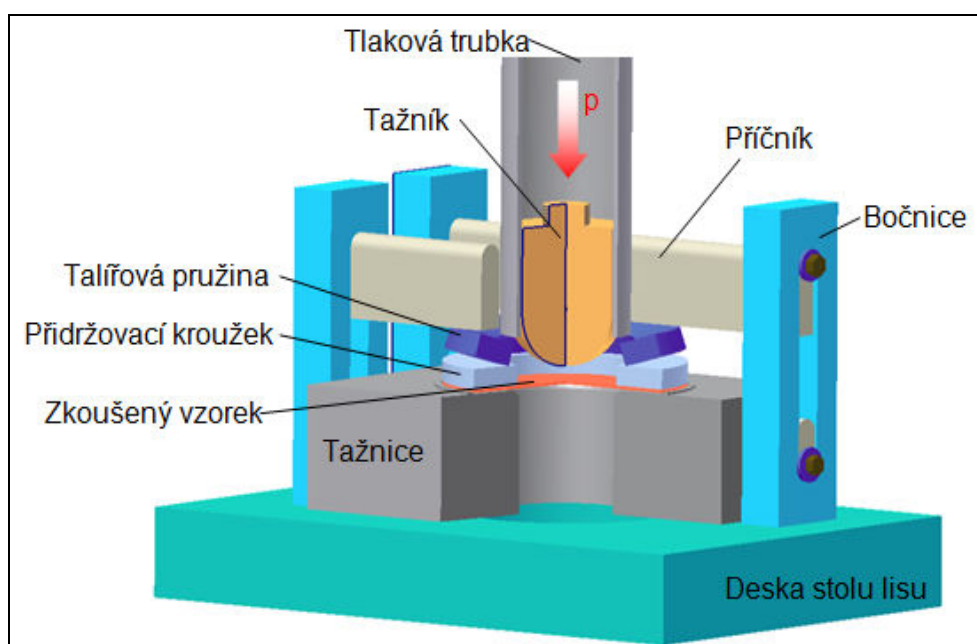
Prvek	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	W
[max %]	0,62	0,19	19,0	0,022	0,018	0,34	0,04	0,06	0,3	0,18

3.2. Podmínky zkoušení materiálu, stroj, nástroj

Vypínání vzorků probíhalo v dílně Katedry strojírenské technologie na dvojčinném hydraulickém lisu CBA 300/63 (*obr. 3.2*), s pomocí speciálního nástroje sestaveného na Katedře strojírenské technologie (*obr. 3.3*). Toto zařízení umožňuje vypínání vzorku za vyšších rychlostí tažení, v této práci konkrétně $v = 17,78 \text{ m/s}$, která odpovídá rychlosti bočního nárazu při crash testech. Jeho princip spočívá ve zrychlování pohybu tažníku pomocí stlačeného vzduchu a použití talířové pružiny k zabránění vtáhnutí materiálu do nástroje.



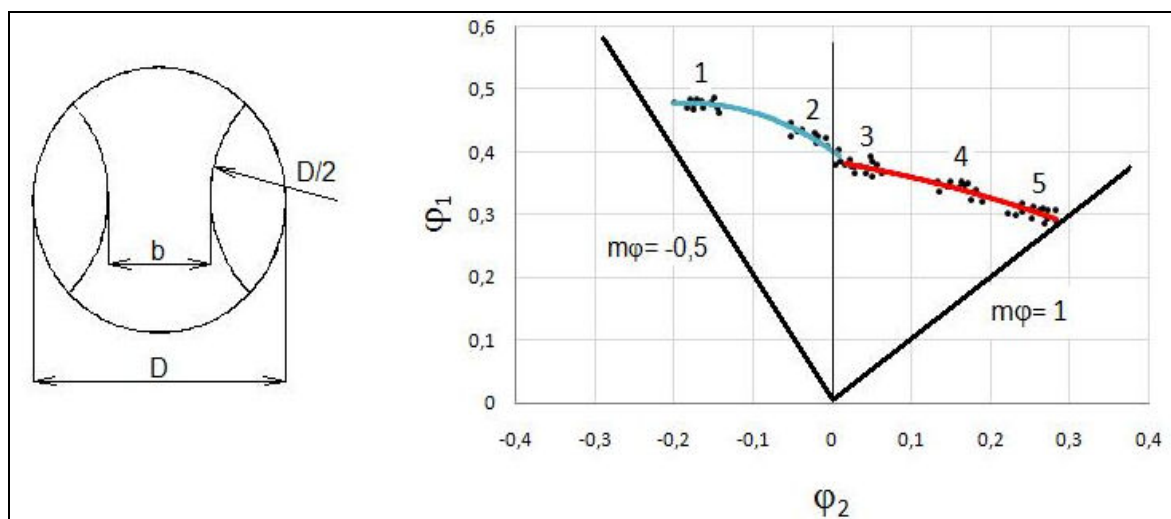
Obr. 3.2 Dvojčinný hydraulický lis CBA 300/63



Obr. 3.3 Upínací nástroj [11]

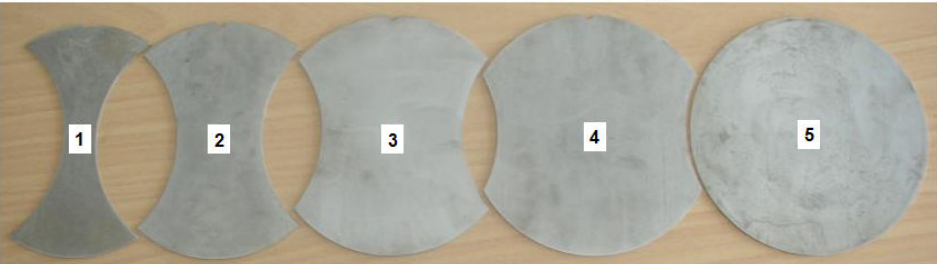
3.3. Zkoušené vzorky materiálu

Pro použitou metodu vypínání tvarových vzorků polokulovým tažníkem bylo připraveno 5 různých tvarů zkušebních vzorků pro pokrytí celého intervalu stavů přetvoření $m_\varphi \in \langle -0,5; 1 \rangle$. Pro plynulé pokrytí celého intervalu je potřeba 13 stop o různých šířkách, s ohledem na dostupné množství materiálu TWIP 1200 bylo však použito 5 vzorků. Každá změna šířky b modeluje rozdílný stav přetvoření m_φ . A to od případu plného nástřihu ($b = D$; deformační stopa 5), což odpovídá $m_\varphi = 1$ a simuluje rovnoosé vypínání testovaného materiálu, po vzorek s minimální šířkou ($b = 30$ mm; deformační stopa 1). Ten odpovídá stavu přetvoření pro zkoušku tahem (jednoosé napětí), kdy $m_\varphi = -0,5$ (obr. 3.4). Šířka vzorků volena byla od 30 do 210 mm (tab. 3.2), a na požadované rozměry byly upraveny pomocí technologie řezání vodním paprskem a následně hrany jemně zbroušeny. Zabránilo se tak praskání vzorků vlivem mikrotrhlin, které do tohoto materiálu vnáší např. stříhání. Z důvodu vlivu anizotropie materiálu na výslednou polohu KMP a shody hlavního přetvoření φ_1 se směrem válcování se DMP zjišťuje pro směr odebrání vzorků 0° vůči směru válcování.



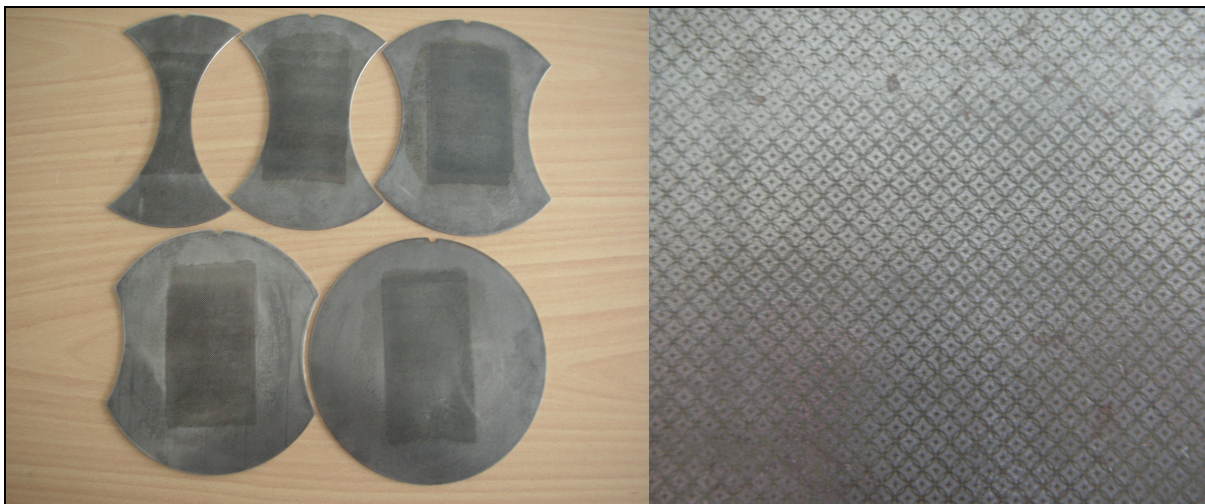
Obr. 3.4 Schéma vzorku, DMP pro 5 deformačních stop

Tab. 3.2 Šířky deformačních stop

Označení vzorků	Stopa				
	1	2	3	4	5
Šířka b [mm]	30	75	120	160	210
Označení stop					

3.3.1. Deformační síť na povrchu vzorků

Na připravené vzorky byla posléze metodou elektrochemického leptání nanесena deformační síť. V současné době existuje více postupů jak nanést na testovaný vzorek deformační síť, ale vzhledem k možnostem zařízení katedry a zejména pro svoji nižší pracnost a vyhovující přesnost byla použita metoda elektrochemického leptání. Princip této metody spočívá v nanесení deformační sítě pomocí speciální sítotiskové šablony v důsledku průchodu elektrického proudu přes elektrolyt, šablonu a materiál. Výsledná deformační síť je tedy elektrochemicky vyleptána na povrch zkoušeného vzorku. Velkou výhodou takto nanесené deformační sítě je, že nedochází k jejímu setření během testování daného materiálu. Existuje velké množství šablon, které mají různé tvary a velikosti deformačních elementů. Do této práce byla použita deformační šablona s překrývajícími se kruhovými elementy s křížkem uprostřed tohoto elementu (obr. 3.5). Od výrobce (fa Erichsen) byl udán průměr deformačního elementu $D=2\text{ mm}$. Pro měřený materiál je potřeba změřit elementy nedeformované sítě, tj. počáteční rozměry $L_{01,2}$. Měření probíhalo pomocí dílenského mikroskopu připojeného k PC, byl učen aritmetický průměr z proměření 30-ti náhodně vybraných elementů na povrchu testovaného materiálu. Byly naměřeny rozměry $L_{01}=1,994\pm0,006\text{mm}$ a $L_{02}=2,003\pm0,004\text{mm}$.



Obr. 3.5 Vzorky s deformační sítí a detail deformační sítě

Po provedení procesu vypínání až do vzniku trhliny bylo potom na vzorku vybráno několik elementů, které splňují námi přijatou definici mezního stavu. V této práci bylo pro každou (1-5) stopu měřeno 5 vzorků, na kterých byly vybrány 2-3 elipsy splňující požadavky definovaného mezního stavu. Každá stopa je tedy do DMP vynesena pomocí 10ti až 15ti bodů. Na vybraných elipsách se pomocí dílenského mikroskopu připojeného k PC stanovily rozměry L_1 a L_2 . Z těchto rozměrů byly pomocí vzorce (5) vypočítány velikosti hlavního (φ_1) a vedlejšího (φ_2) mezního přetvoření.

$$\varphi_{1k,2k} = \ln \frac{L_{1,2}}{L_{01,2}} [-] \quad (5)$$

3.4. Průběh zkoušky

Zjišťování DMP probíhalo za rychlosti tažení $v=17,78\text{m/s}$; která odpovídá rychlosti bočního nárazu při cash testech. S ohledem na předešlou historii tváření materiálu probíhalo měření také po předdeformování vzorků, a to na velikost 1/3 a 2/3 mezního stavu. Mezní stav byl určen z DMP zjišťovaného bez vlivu předdeformace. V tab. 3.3 je vysvětleno označování DMP za různých podmínek měření.

Tab. 3.3 Označení DMP

Označení	Význam
FR	Zjišťování DMP za rychlosti $v = 17,78 \text{ m/s}$
FR 13	Zjišťování DMP za rychlosti $v = 17,78 \text{ m/s}$ a velikosti předdeformace $1/3$ mezního stavu
FR 23	Zjišťování DMP za rychlosti $v = 17,78 \text{ m/s}$ a velikosti předdeformace $2/3$ mezního stavu

3.5. Zpracování naměřených hodnot

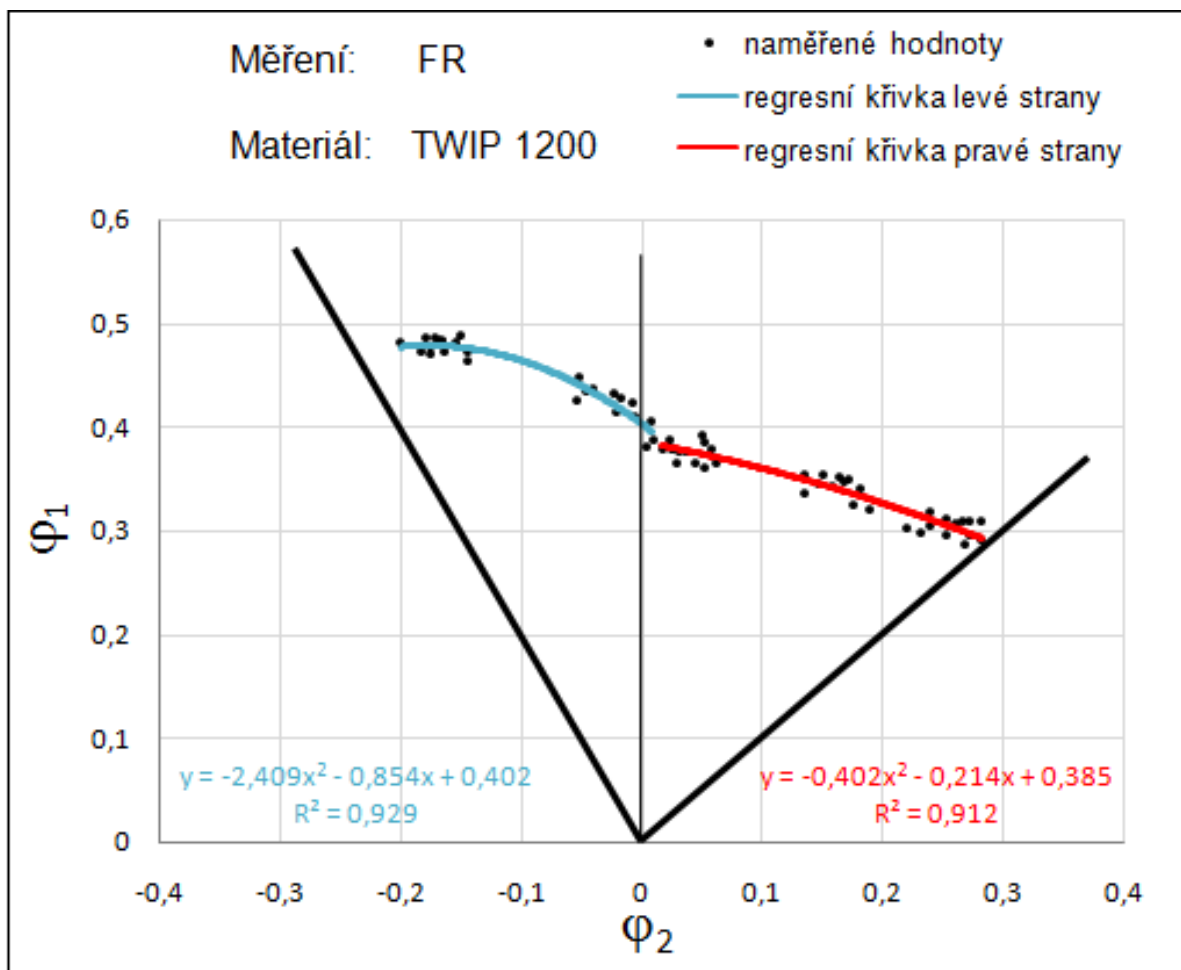
Po výběru a změření elementů, které splňují naše podmínky ohledně dosažení mezního stavu, vypočítáme pomocí výše uvedeného vzorce hodnoty kritických mezních přetvoření φ_{2k} , φ_{1k} , a jejich vynesení do DMP získáme určité body. V této práci vytvořily body pro každou (1-5) stopu shluk bodů, který potom s dalšími shluky od ostatních stop vytváří KMP a určuje hranice použitelnosti materiálu TWIP 1200. Tyto body mají určitou chybu (odchylku) danou nerovnoměrným rozložením vlastností materiálu, stanovením mezního stavu, a přesností měřicího zařízení. Tato chyba je eliminována proložením bodů regresní křivkou, která představuje KMP. Pro obě strany DMP byla použita polynomická křivka druhého řádu o rovnici (6):

$$\varphi_{1k} = \mathbf{A} \cdot \varphi_{2k}^2 + \mathbf{B} \cdot \varphi_{2k} + \mathbf{C} \quad (6)$$

kde A, B, C jsou regresní koeficienty polynomické křivky.

3.6. DMP pro zkoušku FR

Postupem pospaným v *kapitolách 2.4. a 3.4.* byl stanoven DMP pro podmínky FR, tedy vzorek bez předdeformace a rychlost tažení $v=17,78$ m/s (*tab. 3.3*). DMP zjištěný při této zkoušce je na *obr. 3.6*, regresní koeficienty jsou v *tab. 3.4*.



Obr. 3.6 DMP při podmínkách FR

Tab. 3.4 Regresní koeficienty DMP při podmínkách FR

DMP - FR	Levá větev DMP			Pravá větev DMP		
Regresní koeficienty	A	B	C	A	B	C
	-2,409	-0,854	0,402	-0,402	-0,214	0,385

3.6.1. Zkoušky FR 13 a FR 23

Podmínky pro tyto zkoušky jsou popsány v *tab. 3.3*, rychlost tažení je $v=17,78$ m/s a vzorky jsou předdeformovány na $1/3$, resp. $2/3$, z mezního stavu pro materiál TWIP 1200, určeného ze zkoušky FR. Hodnoty předdeformace byly určeny na základě předchozích zkušeností Katedry strojírenské technologie. Hloubky vrchlíků změřené po předdeformaci jsou v *tab. 3.5*. Tyto hodnoty byly zaokrouhleny na nejbližší celé vyšší číslo. Předdeformované vzorky jsou na *obr. 3.7*.

Tab. 3.5 Velikosti předdeformace pro jednotlivé stopy

Stopa	Mezní stav [mm]	Předdeformace	
		1/3 [mm]	2/3 [mm]
1	50	17	34
2	47	16	32
3	42	14	28
4	39	13	26
5	33	11	22



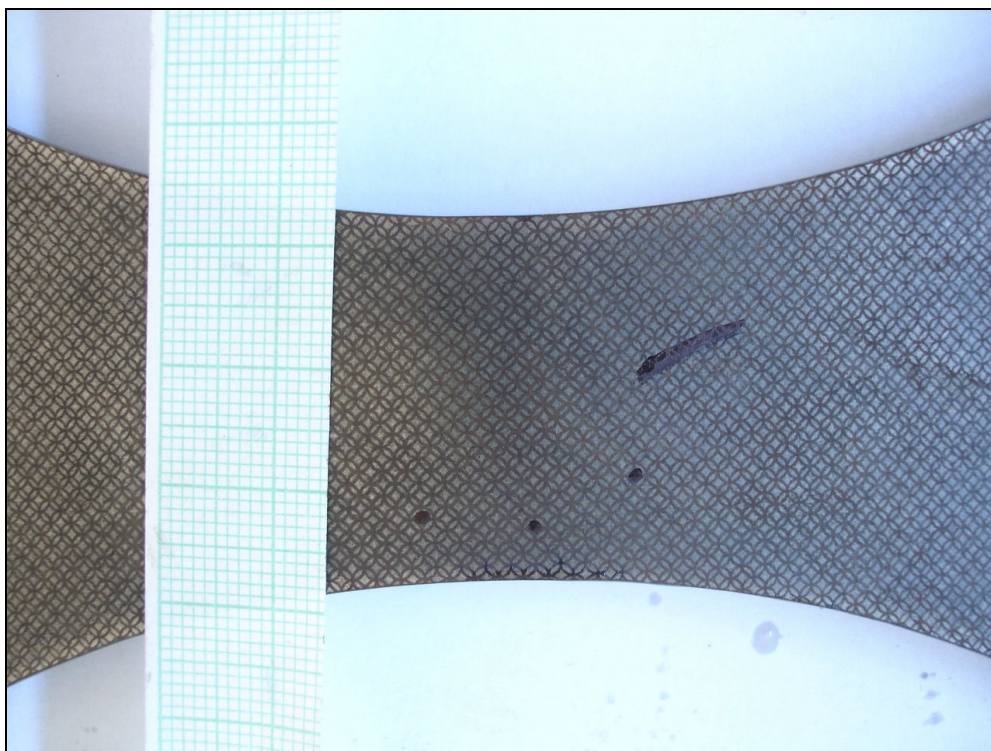
Obr. 3.7 Předdeformované vzorky

Vzorky byly označovány podle následujícího schématu:

např.: **FR – 4 – 1/3 – 1** \Rightarrow

FR	- rychlost tažníku (FR $\rightarrow v=17,78\text{m/s}$)
4	- deformační stopa (1- 5), (<i>tab. 12.1.1</i>)
1/3	- velikost předdeformace (1/3, 2/3)
1	- číslo vzorku (1- 5)

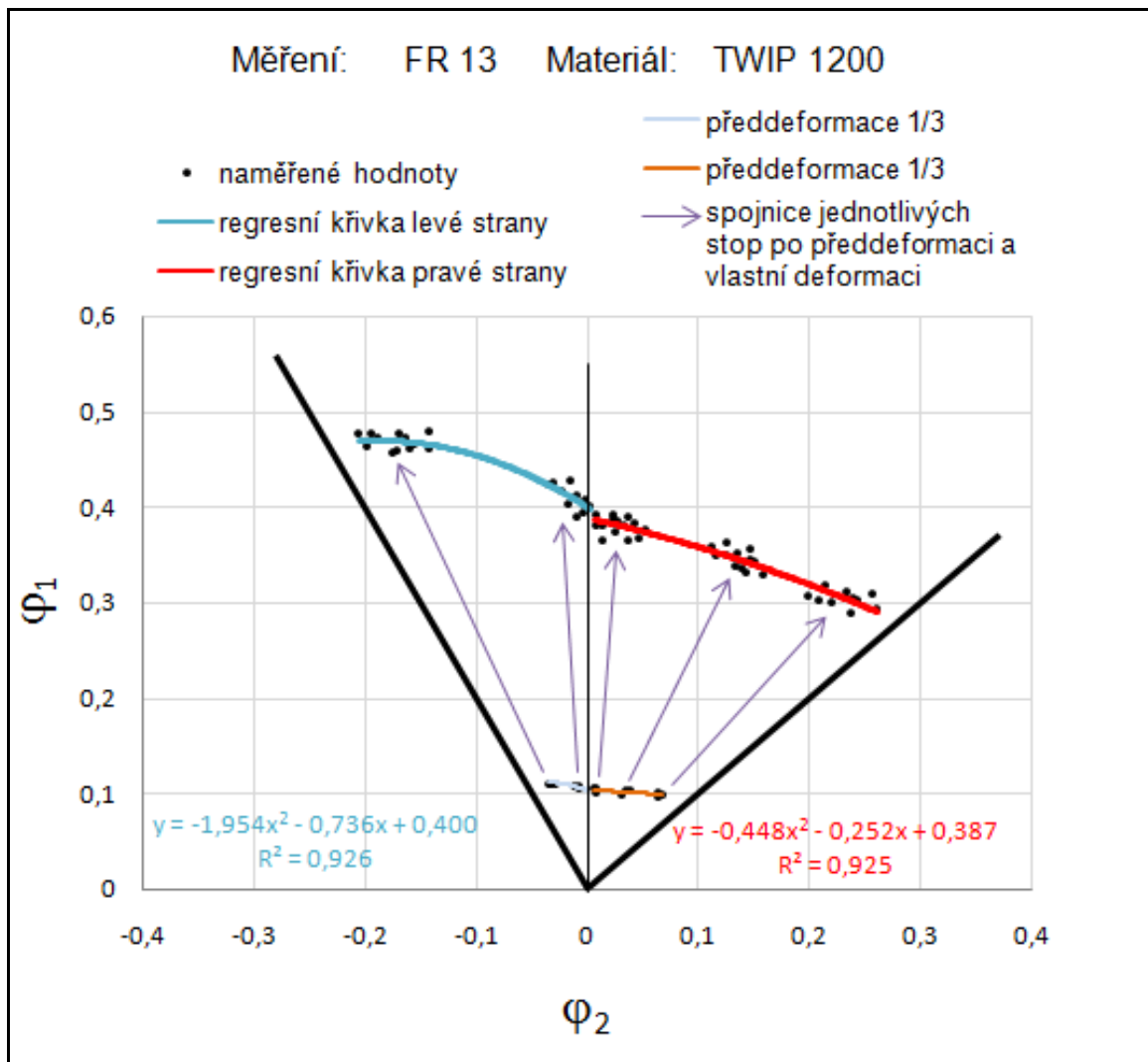
Tyto vzorky byly připraveny pro zkoušky FR 13 a FR 23, podle *tab. 3.5* a *obr. 3.7* je patrné, že předdeformace způsobily malá přetvoření a nezanedbatelné bylo také odpružení. Ke správnému vyhodnocení bylo potřeba znát velikost přetvoření po předdeformaci a po dosažení mezního stavu vzorku jednoho a téže elementu. Vzorky byly proto orýsovány pro určení referenčních bodů a společně s měřítkem (milimetrovým papírem) nafoceny. Milimetrový papír jako měřítko byl použit kvůli kalibraci měření délek pomocí softwaru **Image-Pro Plus**. Tím bylo docíleno toho, že se po dosažení mezního stavu bude měřit stejný element jako po předdeformaci. Z důvodu malého rozptylu velikosti těchto elementů po předdeformaci byly pro každou stopu měřeny pouze tři elementy. Na *obr. 3.8* je fotografie předdeformovaného vzorku s přiloženým měřítkem.



Obr. 3.8 Vzorek s měřítkem (**FR-1-1/3-2**)

3.6.1.1. DMP pro zkoušku FR 13

Výše popsaným způsobem byl stanoven DMP za podmínek FR 13 (rychlost tažníku $v=17,78\text{m/s}$ a předdeformace 1/3). Výsledný diagram je na obr. 3.9 a regresní koeficienty pro KMP jsou uvedeny v tab. 3.6.



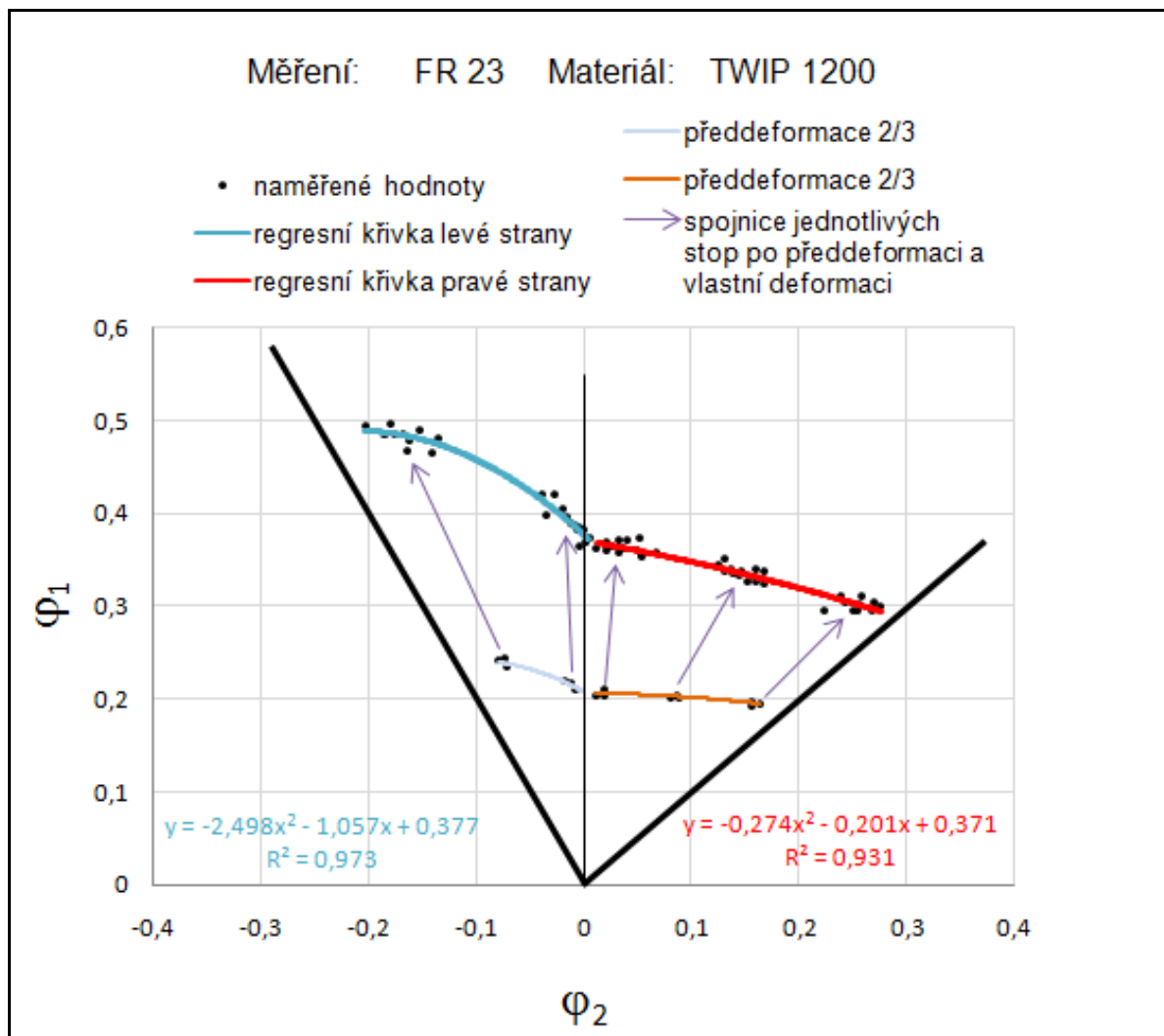
Obr. 3.9 Diagram FR 13 ($v=17,78\text{m/s}$, předdeformace 1/3)

Tab. 3.6 Regresní koeficienty pro DMP při podmínkách FR13 ($v_2 = 17,78 \text{ m/s}$ a velikost předdeformace 1/3)

DMP – FR 13	Regresní koef.	Levá větev DMP			Pravá větev DMP		
Regresní koeficienty	pro	A	B	C	A	B	C
	DMP	-1,954	-0,736	0,400	-0,448	-0,252	0,387
	Předdef.	-3,916	-0,334	0,104	-0,192	-0,077	0,104

3.6.1.2. DMP pro zkoušku FR 23

Diagram byl sestaven stejným způsobem jako v *kap. 3.6.1.1.*, za podmínek zkoušky FR 23, tj. rychlosti tažníku $v=17,78\text{m/s}$ a předdeformaci 2/3. Výsledný diagram je na *obr. 3.10* a regresní koeficienty jsou v *tab. 3.7*.



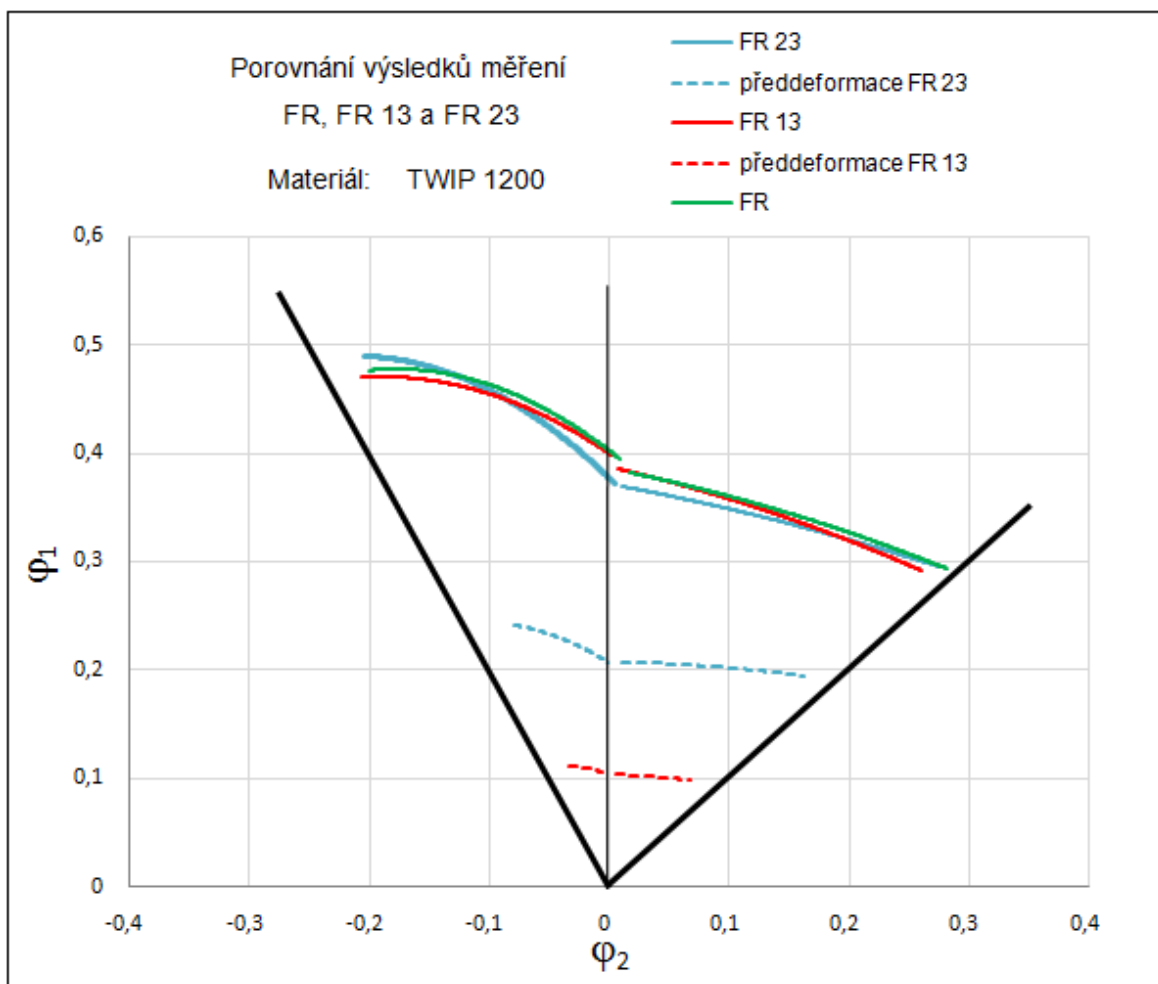
Obr. 3.10 Diagram FR 23 ($v=17,78\text{m/s}$, předdeformace 2/3)

Tab. 3.7 Regresní koeficienty pro DMP při podmínkách FR23 ($v_2 = 17,78 \text{ m/s}$ a velikost předdeformace 2/3)

DMP – FR 23	Regresní koef.	Levá větev DMP			Pravá větev DMP		
Regresní koeficienty	pro	A	B	C	A	B	C
	DMP	-2,498	-1,057	0,377	-0,274	-0,201	0,371
	Předdef.	-3,200	-0,671	0,207	-0,428	-0,002	0,206

3.6.2. Srovnání DMP za všech podmínek (FR, FR 13, FR 23)

Na obr. 3.11 je DMP s KMP sestrojenými za všech podmínek zkoušení, v tab. 3.8 jsou uvedeny regresní koeficienty KMP ze všech měření.



Obr. 3.11 Srovnání KMP za všech podmínek zkoušení

tab. 3.8 Regresní koeficienty DMP při všech podmínkách měření

DMP - FR	Levá větev DMP			Pravá větev DMP		
Regresní koeficienty	A	B	C	A	B	C
FR	-2,409	-0,854	0,402	-0,402	-0,214	0,385
FR 13	-1,954	-0,736	0,400	-0,448	-0,252	0,387
FR 23	-2,498	-1,057	0,377	-0,274	-0,201	0,371

4. Závěr

Ze zkoušky tahem, provedené v předchozích experimentech, byly pro tuto bakalářskou práci k dispozici pevnostní charakteristiky materiálu TWIP 1200. Mez pevnosti je $R_m=1150$ MPa, mez kluzu $R_{P0,2}\approx 590$ MPa, a tažnost materiálu je $A_{50}=60\%$. Poté byly vypínáním zkušebních těles různé šíře zjištěny hodnoty maximálních dovolených deformací pro bezpečné tváření materiálu TWIP 1200 a sestrojeny DMP. Vynesením naměřených hodnot do diagramů byly určeny KMP, určující oblast bezpečných deformací pro daný materiál. Porovnání KMP sestrojených pro všechny podmínky zkoušení je na *obr. 3.11*. Na tomto grafu je vidět vzájemná poloha jednotlivých KMP.

Zkouška za podmínek **FR** probíhala při rychlosti tažníku $v = 17,78$ m/s a bez předdeformace. Zde dosahuje levá strana KMP hodnot $\varphi_1 \approx 0,48$ při stavu přetvoření $m_\varphi = -1/2$, který simuluje podmínky při zkoušce tahem. Levá strana KMP poměrně výrazně klesá, kdežto pravá strana má téměř lineární průběh, až ke stavu přetvoření $m_\varphi = 1$, simulujícím 2osý tah. DMP pro zkoušku FR je na *obr. 3.6* (strana 29).

Zkoušky **FR 13** a **FR 23** probíhaly za rychlosti tažníku $v = 17,78$ m/s a po předdeformování vzorků na 1/3 (resp. 2/3) mezního stavu. Cílem předdeformace bylo porovnat chování materiálu TWIP za různých výchozích podmínek, aby byly co nejvíce simulovány skutečné podmínky jako při tváření materiálu. Diagram zkoušky **FR 13** je na *obr. 3.9* (strana 32). KMP předdeformace je v podstatě lineární a pohybuje se od hodnot $\varphi_1 \approx 0,11$ při stavu přetvoření $m_\varphi = -1/2$ po $\varphi_1 \approx 0,09$ při stavu přetvoření $m_\varphi = 1$. Vlastní KMP dosahuje u stavu přetvoření $m_\varphi = -1/2$ menších hodnot než FR, $\varphi_1 \approx 0,47$. Okolo stavu přetvoření $m_\varphi = 0$ se KMP FR 13 prakticky shoduje s KMP FR. Pravá strana klesá k nepatrně nižším hodnotám, u stavu přetvoření $m_\varphi = 1$ je $\varphi_1 \approx 0,28$. Jiný průběh má KMP pro zkoušku **FR 23**, její diagram je na *obr. 3.10* (strana 33). U KMP předdeformace už lze pozorovat nelineární průběh a pohybuje se od hodnot $\varphi_1 \approx 0,24$ při stavu přetvoření $m_\varphi = -1/2$ po $\varphi_1 \approx 0,195$ při stavu přetvoření $m_\varphi = 1$. KMP pro zkoušku FR 23 dosahuje u stavu přetvoření $m_\varphi = -1/2$ nejvyšších hodnot ze všech provedených měření - $\varphi_1 \approx 0,49$. Poté však strmě klesá a okolo stavu přetvoření $m_\varphi = 0$ je φ_1 naopak nejnižší ze všech zkoušek: $\varphi_1 \approx 0,37$. Odtud se křivka začíná shodovat s předchozími a u stavu přetvoření $m_\varphi = 1$ je téměř totožná se zkouškou FR, kde $\varphi_1 \approx 0,29$.

Porovnání zkoušek je na *obr. 3.11* (strana 34). Z tohoto diagramu můžeme nejlépe posoudit vliv předdeformace na KMP. Ani jedna předdeformace zkušebních vzorků (na 1/3 a 2/3 mezního stavu) nemá zásadní vliv na tvar křivky mezního přetvoření. Vzorky předdeformované na 2/3 mezního stavu dosahovali při stavu přetvoření $m_\varphi = -1/2$ dokonce nejvyšších hodnot φ_1 . V dalších částech diagramu se křivky téměř shodují, a proto můžeme říct, že **předdeformace nemá téměř žádný vliv** na následné tváření materiálu TWIP 1200. Tedy oblast bezpečných deformací se ani po předdeformování materiálu téměř nemění. Tento výsledek je přínosný pro budoucí průmyslové využití materiálu TWIP 1200 a jeho tváření.

Zkoušení materiálů vykazujících TWIP efekt je však pouze v počátcích. Nabízí se mnoho dalších možností ověřování jejich vlastností. Tato bakalářská práce se zabývala pouze jedním určitým materiálem – TWIP 1200. **Cílem dalších výzkumů** může být sledování změn vlastností TWIP materiálů v závislosti na chemickém složení nebo chování TWIP materiálů při různém namáhání. Například ověřením minimálního vlivu předdeformace na výslednou KMP sestrojením DMP za vyšších hodnot předdeformace a za vyšších rychlostí tažení. Další možností je zkoušení TWIP ocelí za podmínek cyklického namáhání a sledování jeho vlivu na vlastnosti materiálu.

Znalost materiálových charakteristik TWIP ocelí je nutná pro jejich rozšíření do průmyslové výroby. TWIP oceli jsou díky svým vlastnostem perspektivním materiálem, splňujícím náročné bezpečnostní požadavky automobilového průmyslu a je třeba odstranit všechny překážky bránící jejich sériovému využívání.

5. Seznam použité literatury

- [1] TMĚJ, Jaroslav. *Tváření kovů : Vybrané statě z teorie*. 1. vyd. Praha: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1977. 121 s.
- [2] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu: Díl 2*. 2. vyd. Brno: CERM, 2002. 392 s.
- [3] LENFELD, Petr. *Technologie II. : 1. část*. 1. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005. 110 s.
- [4] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006. 185 s. Dostupný z WWW:
<http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-80-7080-600-1/pages-img/044.html>.
- [5] PETRUŽELKA, J., HRUBÝ, J. *Strojírenské tváření I*. 1. vyd. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2002. 152 s. Dostupný z WWW:
<<http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Skripta/StrojTvarI.pdf>>.
- [6] QIN, Bo. *Crystallography of TWIP Steel*. Pohang University of Science and Technology, 2007. 100 s. Dizertační práce. Dostupný z WWW: <http://www.msm.cam.ac.uk/phasetrans/2007/QinBo_Thesis.pdf>.
- [7] GRASSEL, O., FROMMEYER, G. *High strength TRIP/TWIP steels development*. Düsseldorf, Germany: Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH, 2000. 19 s. Dostupný z WWW:
<http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TWX-412RWP4F&_user=640831&_coverDate=12/31/2000&_fmt=full&_orig=search&_cdi=5574&view=c&_acct=C000034259&_version=1&_urlVersion=0&_userid=640831&md5=3234eea2639f03d4757a9a502ad36286&ref=full>.
- [8] SOBOTKA, Jiří: *Hodnocení mechanických vlastností nových vysokopevnostních materiálů*, Dizertační práce, TU v Liberci, Liberec 2008
- [9] CHRISTIAN, J. W., MAHAJAN, S. *Deformation twinning*. Oxford, New York : Pergamon Press, c1995. 157 s.
- [10] PEPELNJAK, T., KUMAN, K. Numerical determination of the forming limit diagrams. In *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2006. s. 1-4. Dostupný z WWW:
<http://www.journalamme.org/papers_vol20/1490S.pdf>.
- [11] DOUBEK, Pavel: *Výzkum deformačního chování vysokopevnostních plechů při vyšších rychlostech deformace*, Dizertační práce, TU v Liberci, Liberec 2004
- [12] PLUHAŘ, J., a kol. *Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu*. Praha : SNTL, 1987. 420 s.
- [13] ALAXIN, Ján, et al. *Nauka o materiálu*. Liberec : Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1989. 246 s.



6. Seznam příloh

1. Data z naměřených DMP pro materiál TWIP 1200



Příloha 1

Data z naměřených DMP pro materiál TWIP 1200

DMP - FR				
Stopa	Hlavní osa [mm] L_1	Vedlejší osa [mm] L_2	Hlavní deformace [-] Φ_1	Vedlejší deformace [-] Φ_2
1	1,679	3,209	-0,17534	0,475914
	1,638	3,224	-0,19984	0,480597
	1,672	3,241	-0,17929	0,486009
	1,665	3,195	-0,18349	0,471635
	1,723	3,248	-0,14925	0,488137
	1,678	3,187	-0,17571	0,469128
	1,694	3,232	-0,16622	0,48315
	1,731	3,198	-0,14461	0,472449
	1,699	3,196	-0,16317	0,471988
	1,732	3,172	-0,14404	0,464254
	1,714	3,226	-0,15442	0,481291
	1,686	3,241	-0,17095	0,48595
2	1,985	3,044	-0,00765	0,423221
	1,955	3,068	-0,02292	0,430926
	1,959	3,016	-0,02088	0,413904
	1,911	3,076	-0,04569	0,433678
	2,009	2,915	0,004379	0,380012
	1,965	3,055	-0,01783	0,426828
	1,988	3,001	-0,00617	0,408854
	1,898	3,116	-0,05262	0,446595
	2,014	2,987	0,006867	0,404452
	2,020	2,933	0,00961	0,386012
	1,923	3,086	-0,03943	0,436987
	1,897	3,049	-0,05304	0,424862
3	2,061	2,904	0,029877	0,376137
	2,058	2,874	0,028421	0,365765
	2,129	2,874	0,062339	0,365633
	2,090	2,871	0,043911	0,364879
	2,051	2,909	0,025014	0,377858
	2,103	2,952	0,050051	0,392531
	2,074	2,906	0,036165	0,376982
	2,107	2,861	0,051773	0,361065
	2,048	2,940	0,02355	0,388458
	2,046	2,922	0,022573	0,382317
	2,106	2,930	0,051477	0,385051
	2,117	2,915	0,056686	0,379918
	2,034	2,911	0,016912	0,378545

DMP - FR				
Stopa	Hlavní osa [mm] L_1	Vedlejší osa [mm] L_2	Hlavní deformace [-] Φ_1	Vedlejší deformace [-] Φ_2
4	2,290	2,789	0,135066	0,335732
	2,324	2,839	0,149976	0,353565
	2,288	2,840	0,134305	0,35392
	2,314	2,815	0,145863	0,345011
	2,374	2,828	0,171271	0,349777
	2,356	2,833	0,163651	0,351445
	2,387	2,756	0,176724	0,323829
	2,365	2,823	0,167464	0,347849
	2,417	2,745	0,189213	0,319829
	2,398	2,800	0,181321	0,33965
	2,345	2,809	0,158972	0,342755
5	2,575	2,677	0,25241	0,294778
	2,617	2,655	0,268715	0,286493
	2,543	2,706	0,240031	0,305442
	2,651	2,668	0,281623	0,291378
	2,578	2,723	0,2537	0,311783
	2,613	2,718	0,267185	0,310012
	2,629	2,713	0,27329	0,308011
	2,576	2,678	0,252924	0,295119
	2,495	2,698	0,221096	0,302559
	2,598	2,710	0,261428	0,307011
	2,523	2,687	0,23194	0,298474
	2,543	2,741	0,240031	0,318371
	2,627	2,677	0,272529	0,294844
	2,653	2,713	0,282377	0,308103

DMP – FR 13				
Stopa	Hlavní osa [mm] L_1	Vedlejší osa [mm] L_2	Hlavní deformace [-] Φ_1	Vedlejší deformace [-] Φ_2
1	1,704	3,163	-0,16043	0,461569
	1,736	3,164	-0,14173	0,461968
	1,697	3,197	-0,16445	0,472234
	1,687	3,213	-0,17036	0,477253
	1,712	3,178	-0,15565	0,4663
	1,684	3,156	-0,17214	0,459354
	1,641	3,168	-0,19829	0,463149
	1,658	3,197	-0,18798	0,472261
	1,734	3,218	-0,14306	0,478808
	1,677	3,145	-0,17621	0,455982
	1,647	3,212	-0,19432	0,476954
	1,629	3,209	-0,20531	0,475874
2	1,941	3,050	-0,03011	0,42519
	1,991	2,960	-0,00451	0,395075
	1,997	3,000	-0,00179	0,408691
	1,955	3,026	-0,02302	0,41729
	1,933	3,046	-0,03424	0,423878
	1,980	3,007	-0,01022	0,410987
	1,965	2,985	-0,01774	0,403712
	1,971	3,055	-0,01499	0,426975
	1,983	2,944	-0,00891	0,389986
	2,005	2,980	0,002542	0,401987
3	2,108	2,906	0,052563	0,376687
	2,026	2,915	0,01275	0,380089
	2,017	2,947	0,008297	0,390944
	2,048	2,953	0,02355	0,39287
	2,047	2,940	0,023061	0,388458
	2,051	2,895	0,025051	0,373034
	2,094	2,876	0,045889	0,366363
	2,016	2,915	0,007827	0,379918
	2,089	2,923	0,043372	0,382616
	2,029	2,874	0,014229	0,365753
	2,068	2,918	0,033164	0,380967
	2,076	2,945	0,037129	0,390157
	2,054	2,929	0,026475	0,384709
	2,076	2,870	0,037259	0,364225

DMP – FR 13				
Stopa	Hlavní osa [mm] L_1	Vedlejší osa [mm] L_2	Hlavní deformace [-] Φ_1	Vedlejší deformace [-] Φ_2
4	2,237	2,856	0,111822	0,359407
	2,345	2,769	0,158972	0,328684
	2,268	2,827	0,125585	0,349347
	2,287	2,797	0,133927	0,338527
	2,267	2,865	0,125046	0,362669
	2,298	2,789	0,138725	0,335829
	2,317	2,814	0,147173	0,344741
	2,318	2,846	0,14753	0,355874
	2,327	2,811	0,151266	0,343667
	2,308	2,777	0,143068	0,33157
	2,248	2,826	0,116581	0,348966
	2,288	2,836	0,134364	0,352412
5	2,477	2,740	0,213734	0,318006
	2,598	2,672	0,261338	0,292876
	2,463	2,696	0,208066	0,301818
	2,439	2,710	0,198274	0,306997
	2,528	2,702	0,234001	0,303948
	2,550	2,695	0,242944	0,301447
	2,543	2,702	0,239913	0,303861
	2,584	2,715	0,255972	0,308764
	2,527	2,720	0,233583	0,310862
	2,537	2,662	0,237654	0,289169
	2,493	2,694	0,22034	0,300962
Předdeformace 1	1,936	2,228	-0,03249	0,110952
	1,934	2,228	-0,03372	0,110949
	1,943	2,228	-0,02889	0,110952
Předdeformace 2	1,986	2,220	-0,00699	0,107479
	1,977	2,220	-0,01154	0,107614
	1,984	2,215	-0,00798	0,105525
Předdeformace 3	2,015	2,208	0,007335	0,10191
	2,011	2,214	0,005313	0,10471
	2,018	2,215	0,008739	0,105434
Předdeformace 4	2,079	2,209	0,038585	0,102755
	2,072	2,209	0,03511	0,102747
	2,063	2,202	0,030712	0,099211
Předdeformace 5	2,142	2,199	0,06841	0,098112
	2,130	2,195	0,062949	0,09631
	2,134	2,205	0,064593	0,100912

DMP – FR 23				
Stopa	Hlavní osa [mm] L_1	Vedlejší osa [mm] L_2	Hlavní deformace [-] Φ_1	Vedlejší deformace [-] Φ_2
1	1,690	3,239	-0,16859	0,485224
	1,698	3,183	-0,16386	0,467974
	1,661	3,241	-0,18607	0,485932
	1,700	3,222	-0,16269	0,479987
	1,748	3,227	-0,13512	0,481665
	1,716	3,257	-0,15341	0,490916
	1,672	3,277	-0,17929	0,497044
	1,677	3,238	-0,17631	0,484941
	1,735	3,175	-0,14231	0,465394
	1,631	3,269	-0,20411	0,494382
	1,660	3,242	-0,18675	0,486262
2	2,000	2,926	-0,00041	0,383685
	2,010	2,895	0,004958	0,372873
	1,978	2,946	-0,01139	0,390637
	1,986	2,923	-0,00729	0,382659
	1,944	3,034	-0,02857	0,41993
	1,983	2,937	-0,0087	0,387548
	1,960	2,992	-0,02037	0,405957
	1,991	2,872	-0,00443	0,365031
	1,969	2,962	-0,01579	0,396054
	1,989	2,930	-0,00547	0,384936
	2,004	2,886	0,001611	0,37005
	1,931	2,972	-0,03515	0,399284
	1,924	3,036	-0,03915	0,420589
3	2,023	2,865	0,011411	0,362566
	2,042	2,884	0,020616	0,369066
	2,073	2,864	0,035747	0,362277
	2,049	2,872	0,024115	0,365135
	2,083	2,891	0,040495	0,371788
	2,108	2,843	0,052426	0,354946
	2,043	2,858	0,021105	0,360108
	2,065	2,851	0,031816	0,357684
	2,064	2,894	0,031205	0,372623
	2,105	2,899	0,051002	0,374459
	2,101	2,858	0,0491	0,360279
	2,140	2,851	0,067492	0,357878
	2,110	2,841	0,053335	0,354122

DMP – FR 23				
Stopa	Hlavní osa [mm] L_1	Vedlejší osa [mm] L_2	Hlavní deformace [-] Φ_1	Vedlejší deformace [-] Φ_2
4	2,278	2,835	0,129984	0,352166
	2,365	2,796	0,167464	0,338222
	2,314	2,798	0,145664	0,339122
	2,295	2,787	0,137419	0,334969
	2,329	2,765	0,15233	0,32725
	2,345	2,801	0,158972	0,339914
	2,312	2,784	0,144799	0,333937
	2,291	2,799	0,135675	0,339196
	2,266	2,812	0,124582	0,343785
	2,345	2,762	0,158972	0,325861
	2,364	2,760	0,167041	0,325186
	2,278	2,799	0,129984	0,339157
5	2,618	2,704	0,269097	0,304684
	2,537	2,724	0,237668	0,312105
	2,499	2,678	0,222577	0,295233
	2,548	2,704	0,241995	0,304713
	2,613	2,682	0,267185	0,296611
	2,589	2,719	0,257958	0,310305
	2,583	2,695	0,255638	0,301447
	2,577	2,681	0,253312	0,296292
	2,634	2,694	0,275264	0,300927
	2,568	2,680	0,249866	0,295958
Předdeformace 1	1,857	2,542	-0,07459	0,24311
	1,849	2,537	-0,07891	0,241209
	1,862	2,520	-0,0719	0,234405
Předdeformace 2	1,964	2,484	-0,01842	0,220013
	1,982	2,461	-0,00898	0,210795
	1,976	2,476	-0,01229	0,21669
Předdeformace 3	2,037	2,442	0,018394	0,202973
	2,021	2,447	0,010512	0,204709
	2,038	2,462	0,01869	0,211209
Předdeformace 4	2,180	2,447	0,085953	0,20481
	2,169	2,440	0,080773	0,201908
	2,186	2,441	0,088542	0,202294
Předdeformace 5	2,336	2,415	0,155108	0,191611
	2,336	2,430	0,155312	0,198113
	2,355	2,425	0,163096	0,195912

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. O právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji – li bakalářskou práci nebo poskytnu – li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with head of the thesis and a consultant.

Date

Signature